



Hugo Alexandre Antunes Batista

Licenciado

Análise Térmica e Estrutural de barragens de BCC - (Betão Compactado com Cilindros)

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Civil - Perfil Estruturas

Orientador: Prof^a. Doutora Maria Teresa G. Santana, FCT - UNL
Co-orientador: Prof^a. Doutora Zuzana Dimitrovová , FCT - UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra
Arguente: Investigadora Noemí Alejandra Schclar Leitão, LNEC
Vogal: Prof^a. Doutora Maria Teresa G. Santana, FCT - UNL
Vogal: Prof^a. Doutora Zuzana Dimitrovová , FCT - UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro de 2011

“Copyright” Hugo Alexandre Antunes Batista, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

O desenvolvimento deste trabalho não é apenas meu, é a soma e contributo de todas as seguintes energias.

A estas o meu sincero e profundo Muito Obrigado:

À Professora Maria Teresa Santana pela total disponibilidade sempre demonstrada, amizade e partilha.

À Professora Zuzana Dimitrovová pela ajuda essencial no desenvolvimento do modelo em ANSYS.

Ao Professor Corneliu Cismasiu pela atenção em ter disponibilizado um computador do DEC para realizar as análises computacionais, quando o meu computador já não tinha capacidade.

Aos meus amigos de sempre, por estarem presentes, pela força moral, carinho e preocupação.

À Magda Alves Moita por ser quem é, pelo amor, compreensão, e apoio incondicional.

Aos meus pais, por serem os melhores pais do mundo, pelo apoio infinito, e por me ensinarem a ser o homem que sou hoje!

Resumo

O Betão compactado com cilindros (BCC) aplicado a barragens é uma técnica empregue inicialmente nos anos 70, mas bastante recente em Portugal. Este tipo de betão tal como o betão convencional sofre uma reacção exotérmica que se caracteriza pela libertação de calor, estando este fenómeno directamente relacionado com o calor de hidratação gerado, bem como da velocidade de colocação de cada camada e temperatura ambiente que se faça sentir no momento dessa colocação. Este fenómeno ocorre desde que é aplicado o betão e podendo perdurar muito após a completa construção da barragem. Neste seguimento são realizadas importantes tarefas em fase de projecto como a análise térmica e consequente análise estrutural para que por um lado se possa otimizar esta construção o máximo possível e por outro prever que a obra será terminada com todos os requisitos de desempenho, segurança e durabilidade.

O presente trabalho foca-se na criação de um modelo em 2D utilizando um programa comercial de elementos finitos, o ANSYS, usando assim a sua funcionalidade *Birth & Death* para recriar a sequência de construção por camadas do betão compactado com cilindros (BCC). Este modelo foi aplicado à Barragem do Pedrogão, a primeira obra de BCC construída em Portugal e para isso foram usadas todas as propriedades do betão que foi empregue na mesma obra. Assim, é possível prever as variações de temperatura sentidas ao longo do tempo na barragem. Este modelo foi verificado quando os seus dados foram comparados às distribuições de temperatura registados na barragem do Pedrogão por meio de termómetros. Além disso é realizada uma análise de tensões podendo-se saber a probabilidade de ocorrência de tracções e compressões no corpo da mesma.

Palavras chave:

Barragens, Betão Compactado Cilindros, ANSYS, Birth and Death, APDL

Abstract

Rolled Compacted Concrete applied to dams, is a technique initially used in the 70's, but quite recently used in Portugal. RCC as conventional concrete is characterized by an exothermic reaction that produces heat, this is directly related with the hydration heat process, as well as the speed of concrete placement and the environmental temperature at that time. This process happens since the concrete construction is initiated till much time after the end of construction. Because of this, a lot of actions take place during the project phase, as thermal and structural analysis to optimize construction process and also to predict and insure the safety and durability standards.

In this thesis is developed a 2D model using the finite element program ANSYS, and the *Birth & Death* technique to simulate the construction sequence of RCC. This model was applied to the first RCC dam constructed in Portugal and used all the concrete properties used in the same dam. This way is possible to predict temperature variations felt in the body dam. This model was verified by comparing with the data provided by thermometers built in Pedrógão's dam. A structural analysis is performed and is made an assessment of the crack analysis, which allows to check the global structural stability.

Keywords:

Roller Compacted Concrete, dams, Birth and Death, ANSYS, APDL

Índice

Copyright	i
Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	xvii
1 Introdução	1
2 Barragens de Betão Compactado com Cilindros	3
2.1 Generalidades sobre Barragens	3
2.2 Evolução histórica do uso de BCC em barragens	7
2.2.1 Actualidade na Europa	8
2.2.2 Actualidade em Portugal	10
2.3 O que é uma barragem de BCC	12
2.4 Vantagens e Desvantagens do BCC	14
2.5 Materiais e Mistura do BCC	15
2.6 Propriedades do BCC endurecido	16
2.6.1 Características Mecânicas	17
2.6.2 Características de Deformabilidade	20
2.6.3 Durabilidade	21
2.6.4 Propriedades Térmicas	21
2.7 Considerações de Construção e Projecto	24
3 Problema Térmico	29
3.1 Generalidades sobre transferências de calor	29
3.2 Modos da Transferência de Calor	30
3.2.1 Condução	30
3.2.2 Convecção	36
3.2.3 Radiação	37

4	Implementação em ANSYS	41
4.1	Generalidades sobre ANSYS	41
4.2	Exemplos Simples Comparativos FLAC <i>versus</i> ANSYS	42
4.2.1	Exemplo - Regime estacionário	42
4.2.2	Exemplo - Regime transiente	44
4.3	Exemplo do processo construtivo de um BCC	46
4.3.1	Apresentação do problema base	46
4.3.2	Metodologia e Sequência da Análise Térmica em ANSYS	48
4.3.3	Apresentação do Modelo	51
4.3.4	Estudo de Refinamento	57
4.4	Processo construtivo de um BCC com 20 Camadas	63
4.4.1	Apresentação do modelo em ANSYS	63
4.4.2	Melhoramento ao modelo inicial	68
5	Aplicação da metodologia em ANSYS a uma Barragem	71
5.1	Implementação em ANSYS	71
5.2	Análise Térmica	76
5.3	Análise Estrutural	80
6	Conclusões e desenvolvimentos futuros	89
6.1	Conclusões gerais	89
6.2	Desenvolvimentos futuros	90
	Bibliografia	93
A	Desenvolvimento da taxa de geração de calor	97
B	Rotina desenvolvida em Ansys	99

Índice de Figuras

2.1	Barragem de gravidade - [20].	4
2.2	Perfil aligeirado da Barragem do Torrão- [21].	4
2.3	Barragem em Contrafortes - [37].	5
2.4	Barragem em Arco-Abóboda - [21].	5
2.5	Barragem de Platanovryssi na Grécia em construção - [35]	6
2.6	Perfil Genérico de uma Barragem de Terra - [20].	7
2.7	Perfil Genérico de uma Barragem de Enrocamento - [20].	7
2.8	Barragem de Shimajigawa no Japão - [35]	8
2.9	Barragem de Willow Creek nos EUA - [35]	8
2.10	Vista em Planta da Barragem de Rizzanese - [36]	9
2.11	Barragem de Plantanovryssi na Grécia já em fase final de construção - [35]	9
2.12	Vista aérea da barragem La Breña II próximo de Cordoba, Espanha - [35]	10
2.13	Barragem de Enciso em fase de construção - [35]	10
2.14	Distribuição de barragens segundo o PNBEPH	11
2.15	Futura Barragem do Alvito	11
2.16	Barragens de Baixo Sabor - [33].	12
2.17	Localização da albufeira do Pedrogão em relação a Alqueva - [27]	13
2.18	Barragem do Pedrogão - [27]	13
2.19	Relação dosagem de cimento (kg/m^3) e resistência à compressão (MPa) - [8]	17
2.20	Relação dosagem de cimento com pozzolanas (kg/m^3) e resistência à compressão (MPa) - [8]	18
2.21	Modos de transferência de calor numa barragem de betão - [16]	22
2.22	Curva do calor de hidratação para diferentes materiais cimentícios	23
2.23	Esquema de misturadora continua	25
2.24	Transporte da mistura através de tapetes rolantes na barragem de Breña, em Espanha [35]	26
2.25	Etapas de colocação do BCC em obra, adaptado de [23]	26
2.26	Cravação de chapas para criação das juntas transversais [27]	28
3.1	Exemplo de um material, com um vector normal unitário \vec{n} que determina a sua direcção - [31]	30
3.2	Elemento diferencial contido num sólido em coordenadas cartesianas - [31]	32
3.3	Exemplo para as diferentes condições de contorno.	35
3.4	Exemplo de convecção forçada e livre	36

3.5	Fluxo térmico por convecção, caso de fluxo a viajar da superfície para o fluido $T_w > T_f$	37
3.6	Superfície a uma temperatura T e que emite uma radiação (q/A)	38
4.1	Geometria do elemento 2-D térmico - PLANE 55 e estrutural - PLANE 182 [2]	42
4.2	Exemplo Flac - Placa rectangular	43
4.3	Distribuição de temperatura ao longo da peça em regime estacionário	43
4.4	Exemplo Flac - Placa geradora de calor	44
4.5	Exemplo Flac	45
4.6	Distribuição da temperatura para diferentes tempos e soluções	45
4.7	Curva de hidratação do cimento ao longo do tempo	47
4.8	Curva de geração de calor ao longo do tempo	47
4.9	Sequência de análise: 1- Estrutura discretizada; 2- Execução da primeira camada; 3- Execução das camadas sucessivas	48
4.10	Fluxograma da sequência da análise térmica em Ansys	50
4.11	Modelo com 3 camadas e refinamento de malha $rm=0.15$	53
4.12	Distribuição de temperaturas 3h após ter sido iniciada a colocação da 1 ^a camada	54
4.13	Distribuição de temperaturas 5h após ter sido iniciada a colocação da 2 ^a camada	54
4.14	Distribuição de temperaturas 1h após ter sido iniciada a colocação da 3 ^a camada	55
4.15	Malha de elementos finitos para 3 camadas e $rm=0.15$, com os pontos da secção I e II definidos	56
4.16	Evolução da temperatura das 3 camadas na secção II - 1 ^a camada em azul, 2 ^a camada a roxo e 3 ^a camada a vermelho	56
4.17	Sequencia de colocação de 3 camadas ao longo do tempo - FLAC vs Ansys - secção II - Dados do FLAC obtidos de [29]	57
4.18	Gráfico de aproximação para a primeira camada com as diferentes parâmetros iniciais	59
4.19	Gráfico de aproximação para a primeira camada com os parâmetros iniciais 2 e 3	59
4.20	Gráfico de aproximação para a segunda camada com os diferentes parâmetros iniciais	60
4.21	Gráfico de aproximação para a segunda camada com os parâmetros iniciais 2 e 3	60
4.22	Gráfico de aproximação para a primeira camada com diferentes parâmetros iniciais - secção II	61
4.23	Gráfico de aproximação para a primeira camada com os parâmetros iniciais 2 e 3 - secção II	62
4.24	Gráfico de aproximação para a segunda camada com diferentes parâmetros iniciais - secção II	62
4.25	Gráfico de aproximação para a segunda camada com os parâmetros iniciais 2 e 3 - secção II	63
4.26	Malha de elementos finitos para as 20 camadas em Ansys	64

4.27 Colocação de 20 camadas para a secção II ao longo do tempo até 320 horas em ANSYS	65
4.28 Distribuição de temperaturas ao colocar a camada nº20 - 306h	66
4.29 T_{rel} da camada 5 ao longo do tempo	66
4.30 T_{rel} da camada 11 ao longo do tempo	67
4.31 T_{rel} da camada 15 ao longo do tempo	67
4.32 Distribuição de temperaturas no momento que ocorre máxima temperatura (40.87°C) - 387h	68
4.33 Colocação de 20 camadas para a secção II ao longo do tempo até 416 horas em ANSYS	69
5.1 Secção transversal da barragem do Pedrógão - Fonte: www.inag.pt	71
5.2 Definição da barragem do Pedrógão em ANSYS.	73
5.3 Malha de elementos finitos em Ansys aplicada a barragem do Pedrógão	76
5.4 Evolução das temperaturas observadas e calculadas à cota 52,5 m	77
5.5 Evolução das temperaturas observadas e calculadas à cota 62 m	77
5.6 Evolução das temperaturas observadas e calculadas à cota 69 m	78
5.7 Evolução das temperaturas observadas e calculadas à cota 78 m	78
5.8 Evolução das temperaturas no corpo da barragem ao longo da sua construção.	79
5.9 Sequência da análise estrutural em Ansys	81
5.10 Evolução do Módulo de Elasticidade ao longo do tempo	82
5.11 Tensões sentidas no perfil da barragem através da análise estrutural em ANSYS para t=1456 horas.	83
5.12 Distribuição de nós para a análise estrutural	84
5.13 Variação da resistência à tracção média dos betões com a idade - [27]	85
5.14 Variação da resistência à compressão média dos betões com a idade - [27]	85
5.15 Probabilidade de esmagamento do betão para o ponto nº118.	85
5.16 $I_{fissuracao}$ das linhas 1, 2, 3, 4 e 5.	86

Índice de Tabelas

2.1	Resultados da resistência à compressão média para diferentes idades do betão - BCC2	18
2.2	Resultados da resistência à tracção média para diferentes idades do betão - BCC2	19
2.3	Resultados dos módulos de elasticidade média para diferentes idades do betão - BCC2	20
3.1	Valores representativos de condutibilidade térmica de alguns materiais - [31]	32
3.2	Valores aproximados do coeficiente de convecção	38
4.1	Propriedades do Material	44
4.2	Propriedades do Material	46
4.3	Parâmetros iniciais 1, 2 e 3.	52
4.4	Conjuntos de parâmetros iniciais 1, 2 e 3.	58
5.1	Temperaturas médias mensais de Abril a Agosto e temperatura média do mesmo período - (°C)	73
5.2	Parâmetros de calculo da temperatura de betonagem - (°C)	74
5.3	Propriedades Térmicas do Betão - BCC2	76
5.4	Propriedades Estruturais do Betão - BCC2	82

Lista de abreviaturas e símbolos

Abreviaturas

APDL	Ansys Parametric Design Language
BCC	Betão Compactado com Cilindros
DBB	Departamento de Barragens de Betão do LNEC
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MEF	Método dos elementos finitos
PNBEPH	Programa Nacional de Barragens de Elevado Potencial Hidroeléctrico
UNL	Universidade Nova de Lisboa

Símbolos

Letras maiúsculas latinas

A	área
C_p	calor Específico
E	módulo de Elasticidade
H_i	radiação solar directa
$I_{esmagamento}$	índice de esmagamento
$I_{fissurao}$	índice de fissuração
Q	quantidade de calor
$T(x, y, z, t)$	campo de temperaturas em x , y , z e tempo
T_{anual}	temperatura média anual
T_{mensal}	temperatura média mensal
$T_{agregados}$	temperatura da trituração dos agregados
$T_{mistura}$	temperatura da mistura dos agregados

$T_{transporte}$ temperatura do transporte da mistura

T_w temperatura de uma superfície

T_f temperatura de um fluido

Letras minúsculas latinas

f_c resistência à compressão

f_{ct} resistência à tracção

h coeficiente de convecção

h altura de cada camada

h_r coeficiente de radiação

n número de camadas a executar

\vec{n} vector normal unitário

k condutibilidade Térmica

l comprimento de cada camada

p intervalo de tempo entre cada camada

p pressão

pm refinamento da hora

q parâmetro para prolongar a análise térmica

\bar{q} geração de calor

rm refinamento da malha

t tempo

t_a temperatura média ambiente

t_b temperatura da betonagem

Letras minúsculas gregas

α difusividade térmica do meio - Condução

α absorvidade - Radiação

ε extensão

ρ densidade

ρ reflectividade - Radiação

σ_c tensão à compressão

σ_t tensão de tracção

τ transmissividade - Radiação

Capítulo 1

Introdução

Numa sociedade onde a competitividade em projectos de estruturas é cada vez maior, é fundamental elaborar um projecto que seja rápido de se concluir e com custos económicos mais competitivos que os concorrentes. Este assunto é ainda mais relevante quando se realizam obras de arte de grande dimensão e importância como é o caso de barragens. Assim, é de extrema relevância e interesse o estudo das barragens BCC, Betão Compactado com Cilindros (em inglês tem a terminologia de RCC, Roller Compacted Concrete). Este tipo de barragens é cada vez mais uma opção quando se trata de erguer tal estrutura, pois é considerado cerca de 25 a 50 % mais económica a sua construção quando comparada com uma barragem de betão convencional [32]. Em conjunto com isto, o uso de um betão sem perda de consistência ("concrete of no-slump consistency") reduz o uso de cofragens como em betão convencional e uma construção cíclica por camadas aumenta a taxa de produção [32], traduzindo-se num tempo de execução muito mais reduzido que uma barragem de betão convencional.

Estão assim identificadas as duas grandes vantagens do uso de barragens BCC, rapidez de execução e economia de custos.

Contudo, como em qualquer estrutura de betão, existe o problema do calor gerado devido à hidratação do cimento, especialmente nestas construções onde existe grande volume de betão, assim, é expectável que se atinjam temperaturas elevadas no interior da massa central da barragem. Após este pico a temperatura acaba tendencialmente por descer, fenómeno que pode decorrer durante vários anos até estabilizar, induzindo tensões de tracção no betão que chegam a ultrapassar a resistência à tracção do betão dando origem a fissuração. A fissuração pode ocorrer junto do maciço de fundação, bem como no interior da estrutura ou à superfície desta e se não for controlada pode comprometer o seu correcto funcionamento em termos de estanquidade e durabilidade. É por isso de extrema necessidade e importância fazer uma adequada análise térmica e estrutural das barragens de betão compactado com cilindros, para que se possa optimizar a sua construção mantendo a sua integridade.

Neste trabalho é desenvolvido todo um modelo numérico em elementos finitos usando o software comercial ANSYS, versão 11. Foi escolhido dado ser um software cada vez mais acessível e usado na resolução de diferentes problemas de engenharia, mas sobretudo por ter bastantes recursos disponíveis para a discretização de estruturas, definição de

elementos, capacidade de resolução numérica e disponibilidade de interfaces gráficas. Entre estes recursos há um fundamental para a simulação e resolução do processo construtivo de uma barragem BCC, ou qualquer outro que tenha por base uma metodologia de colocação de camadas de forma sequencial no tempo, é a funcionalidade *Birth & Death*. Esta permite também fazer análises de escavações, construções de túneis e simular assim diversos estágios de construção ao longo do tempo.

No Capítulo 2 é feita uma caracterização das barragens de betão compactado com cilindros (BCC), fazendo um pequeno enquadramento da sua evolução histórica, enumerando as suas vantagens e desvantagens em relação a uma barragem de betão convencional e expondo algumas das suas propriedades e considerações de construção e projecto.

No Capítulo 3 são apresentados os principais fundamentos que regem a transferência de calor, descrevendo-se os três modos básicos que podem actuar numa estrutura a ser analisada: - Condução, - Convecção e - Radiação.

No Capítulo 4 é desenvolvida uma metodologia em ANSYS, com recurso à sua linguagem específica *Ansys Parametric Design Language - APDL*, que realiza uma análise térmica a um problema anteriormente resolvido em FLAC. São comparadas as duas soluções.

No Capítulo 5 é aplicada a metodologia desenvolvida no capítulo anterior à única barragem de BCC construída em Portugal, a Barragem do Pedrogão. Com esta metodologia executa-se uma análise térmica à barragem portuguesa e os dados obtidos são comparados com os dados das temperaturas observadas e registadas no local, por meio de termómetros. É desenvolvida ainda uma metodologia para fazer uma análise estrutural em consequência da análise térmica. E comparadas as tensões de compressão e tracção obtidas, directamente com a resistência das tensões do betão utilizado, fazendo uma análise global da segurança estrutural da barragem do Pedrogão.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho, com sugestões para desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Barragens de Betão Compactado com Cilindros

2.1 Generalidades sobre Barragens

De uma forma geral, o significado de barragem é dado como uma estrutura de retenção artificial da água de um caudal de rio existente ou de águas pluviais, dando origem à formação de uma albufeira. Com isso, apresenta diversas finalidades, desde, abastecimento de água, controlo de cheias, produção de energia hídrica, rega, actividades de recreio, navegação, recarga de águas subterrâneas e controle de poluição.

Para a construção de tamanha obra de arte é necessário bastante rigor e estudo da mesma, dados os custos e a segurança que se deve proporcionar. Nesse sentido, até um projecto desta ordem estar concluído deve passar por 4 fases essenciais: o projecto, a construção, a exploração e observação. É a fase de projecto uma das mais importantes visto ser também a fase de estudo e aqui, dependendo dos fins de uso e características de terreno e fundações, são definidos o tipo de barragem e consequentemente o material de construção [20], [4], [21].

De acordo com os tipos de material de construção, as barragens podem ser divididas em dois grandes grupos: as barragens de betão e as de aterro [20], [37], [21].

- Barragens de Betão

Como a classificação assim o indica, o material principal usado neste grupo de barragens é o betão, embora este tenha algumas limitações de resistência relativamente a grandes comprimentos de barragens. Esta questão é ultrapassada pela forma que é dada ao betão para a construção das barragens, bem como na forma que é feita a transmissão dos esforços às fundações. Dada esta diversidade estas estruturas dividem-se de novo nos 5 modelos referidos em seguida.

- Barragem de gravidade

Este tipo de barragens está apto a resistir às acções da água apenas devido ao peso próprio da estrutura, tendo como característica principal uma base

bastante larga e assim o perfil da barragem é sempre semelhante a um trapézio ou a um triângulo (Figura 2.1). Por estas razões é uma barragem que usa grandes quantidades de betão na sua construção, e por isso, para estruturas de grande altura também existem com configurações aligeiradas na zona central, como o caso da barragem do Torrão em Marco de Canavezes (Figura 2.2). Em termos de fundação, são bastante exigentes quanto à resistência dos terrenos e idealmente são formados por um substrato rochoso a pouca profundidade. Constroem-se em vales largos e regiões de topografia suave.

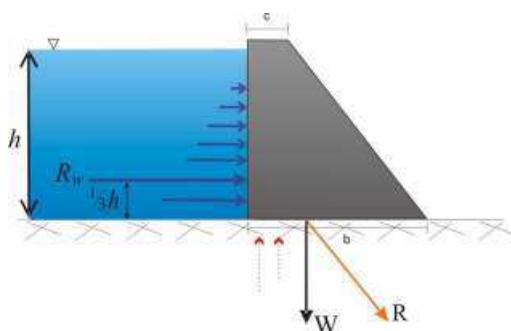


Figura 2.1: Barragem de gravidade - [20].

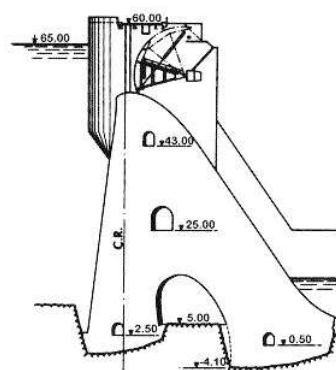


Figura 2.2: Perfil aligeirado da Barragem do Torrão- [21].

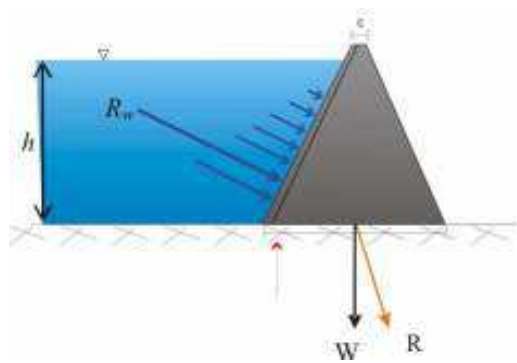
– Barragem de Contrafortes

São um tipo de barragem que deriva directamente das barragens de gravidade, mas que em vez de usar o seu peso próprio para resistir às acções da água, apresenta uma forma aligeirada em contraforte que é responsável pela direcção dos esforços directamente para as fundações (Figura 2.3). Deste modo as fundações são muito importantes e devem ser bastante resistentes pelo que normalmente são realizadas injeções de calda de cimento. Novamente a topografia deve ser suave, os vales largos, mas elevações relativamente baixas e limitadas.

– Barragem de Abóboda

São o tipo de barragem mais complexo de analisar, projectar e construir, pois a sua forma é mais esbelta usando muito menores quantidades de betão relativamente às de gravidade. Usam formas de curvatura em planta (abóbodas espessas ou delgadas de simples curvatura) e também curvatura em perfil (abóbodas de dupla curvatura) (Figura 2.4(a)), sendo que estas formas trazem a vantagem de poder ser construídas em vales estreitos de topografia vigorosa e conferir alturas elevadas. Os esforços transmitem-se não só às fundações, mas também são distribuídos lateralmente pelas rochas dos vales (Figura 2.4(b)).

– Barragem de betão compactado com cilindros (BCC)

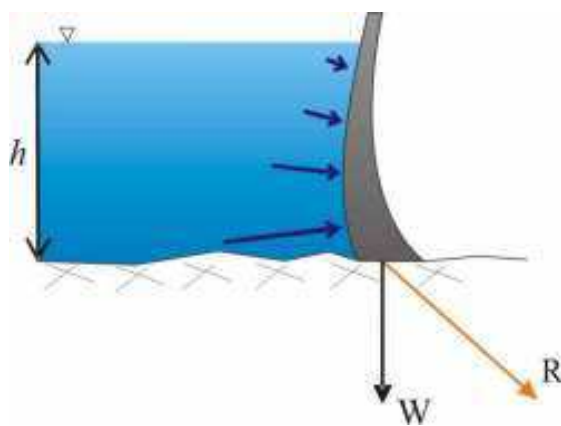


(a) Perfil genérico



(b) Barragem no Brasil

Figura 2.3: Barragem em Contrafortes - [37].



(a) Perfil genérico



(b) Barragem de Gordon (Austrália)

Figura 2.4: Barragem em Arco-Abóboda - [21].

Este tipo de barragem é construído a partir da técnica de compactação usada nas barragens de aterro e agregando também a técnica do betão compactado que se utiliza em pavimento rodoviário. Assim, é criado um género de barragens construído pela sequência de colocação de camadas (cerca de 30 cm cada) e depois compactadas com cilindros. No fim, têm-se um tipo de barragem como as de gravidade, com a vantagem de se ter construído num período de tempo mais reduzido e consequentemente com custos de produção muito menores. Isto devido ao ritmo rápido de colocação das camadas (Figura 2.5). Visto este tipo de betão em barragens ser objecto de estudo da presente dissertação será mais amplamente explanada no desenrolar deste trabalho.



Figura 2.5: Barragem de Platanovryssi na Grécia em construção - [35].

- Barragens de Aterro

Esta barragem é essencialmente construída a partir de materiais escavados na zona da construção ou próximo da mesma por razões económicas. Torna-se uma opção de construção mais viável em vales mais largos ao contrário das barragens em betão e é usada uma técnica de compactação de solos dispostos em camadas consecutivas e de alturas variáveis, usando para isso equipamentos específicos para cada tipo de material ou solo. É um tipo de barragens que se comporta de forma razoável em todos os tipos de fundação, pois dado a sua grande área de base os esforços que são transmitidos à fundação por unidade de área são muito mais reduzidos que nas barragens de betão. Outra vantagem desta técnica em relação as barragens de betão, é o facto de os assentamentos que ocorrem durante e após a construção, não são significativos para comprometer a estabilidade da barragem dada a fácil adaptabilidade do material do aterro. Como forma de prevenir o escorregamento e erosão de material exigem a construção de taludes bastante inclinados na ordem dos 2 a 2.5H :1V. Os defeitos mais correntes além do deslizamento de materiais e fissuras são o galgamento (overtopping) e erosão interna (piping) podendo estes dois últimos levar ao colapso da obra. Distinguem-se ainda dois tipos de barragens de aterro, as de terra onde o material

é de granulometria fina, grossa e de permeabilidade baixa (Figura 2.6) e as de enrocamento onde quase todo o aterro é constituído por fragmento de rocha e cascalho compactados, possuindo dispositivos de impermeabilização pontuais no núcleo ou no paramento de montante (Figura 2.7).

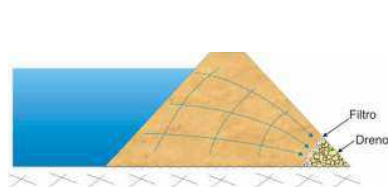


Figura 2.6: Perfil Genérico de uma Barragem de Terra - [20].

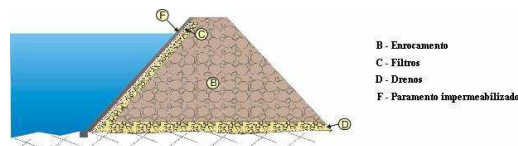


Figura 2.7: Perfil Genérico de uma Barragem de Enrocamento - [20].

Depois da construção de uma barragem, independentemente do material em que é erguida, passará por uma fase de observação no fim da sua conclusão. Em Portugal existe no LNEC o Departamento de Barragens de Betão (DBB), onde se procedem a estudos sobre o comportamento estrutural de grandes barragens e sobre a sua alçada existe o Núcleo de Observação onde se realiza o acompanhamento do comportamento e do controlo de segurança estrutural de cerca das 65 maiores barragens portuguesas de betão e alvenaria. Entre as quais, a mais antiga construída em 1928 a barragem de gravidade em Póvoa com 32 metros de altura e das mais recentes em 2002 de abóboda no Alqueva, com 96 metros de altura ou em 2005 a de gravidade em BCC, a do Pedrogão ([34]). Neste domínio são realizadas visitas periódicas de inspeção e relatórios de análise e interpretação do comportamento observado, mais recentemente com recurso a nova tecnologia já se procede à aquisição e comunicação automática de dados de observação, bem como o uso de sistemas inteligentes para controlo de segurança em tempo real.

2.2 Evolução histórica do uso de BCC em barragens

O betão compactado com cilindros é um material com diferentes aplicações e antes de se usar de forma expressiva para barragens já era usado em pavimentações rodoviárias, aéreas, em parqueamentos automóveis, entre outros fins ([14]). Visto ser um material que para ser aplicado usa uma tecnologia muito semelhante às barragens de aterro, ou seja, a tecnologia de compactação do material depois de colocado usando equipamento pesado adequado (por ex: cilindros), foi então lentamente adoptado para construção de barragens até ter a expressão que tem nos dias de hoje.

O material mais parecido ao BCC dos dias de hoje foi inicialmente usado em 1960-1961 na Tailândia, para a construção do núcleo impermeável da ensecadeira da barragem de aterro de Shihmen. Na década seguinte foram sendo realizados diversos estudos e experiências praticas em algumas barragens com este material, no sentido de aprimorar-lo, percebendo assim as suas vantagens em relação às de betão convencional. Na conclusão desses estudos surge o Japão como pioneiro na construção

de barragens com este tipo de betão em 1978, a barragem de gravidade Shimajigawa (Figura 2.8) com 89 m de altura e em 1982 nos Estados Unidos da América é construída a barragem de Willow Creek (Figura 2.9), a primeira totalmente em BCC com um tempo de construção de apenas 5 meses. Desde este ano até 2008 foram construídas cerca de 362 barragens BCC pelo mundo inteiro ([11]), com maior expressão na China, Japão e EUA ([24]).



Figura 2.8: Barragem de Shimajigawa no Japão - [35].



Figura 2.9: Barragem de Willow Creek nos EUA - [35].

2.2.1 Actualidade na Europa

No presente ano, segundo [5], cerca de 6 barragens de betão compactado com cilindros estão a ser construídas, ou em fase de planeamento, ou ainda a serem estudadas/investigadas no continente Europeu. Localizadas em:

- Rizzanese na ilha da Córsega, França, com uma altura de 40.5 metros será equipada com duas turbinas com uma potência nominal de 27.5 MW cada e com a sua construção a ser iniciada durante este ano, Figura 2.10.

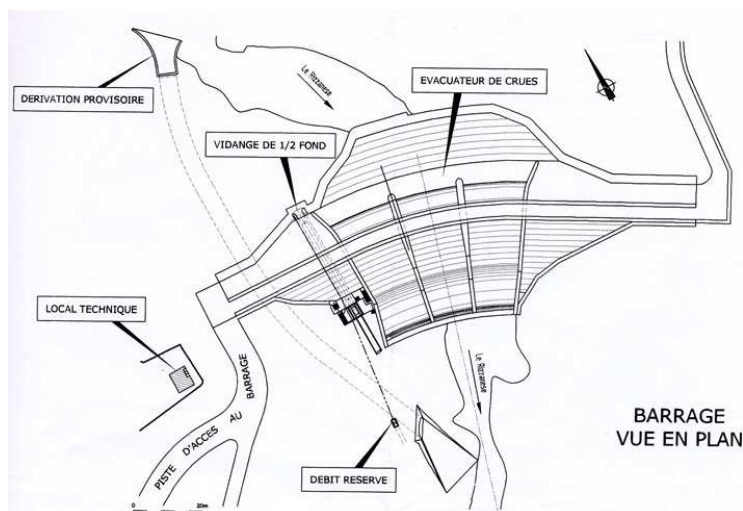


Figura 2.10: Vista em Planta da Barragem de Rizzanese - [36].

- Plantanovrissi na Grécia, com uma altura de 95 metros está equipada com turbinas que lhe conferem uma potência de 116 MW, já foi concluída em 1999, mas neste momento encontra-se de novo em fase de investigação para eventuais melhoramentos, Figura 2.11.



Figura 2.11: Barragem de Plantanovrissi na Grécia já em fase final de construção - [35].

- Valsamiotis na Grécia com uma altura de 66 metros, é uma barragem de gravidade e o seu projecto deve estar concluído em 2011.
- Monte Nieddu em Itália, no rio Flumendosa com uma altura de 78 metros.
- La Breña II em Espanha é considerada a maior barragem de BCC da Europa com 125 metros e do tipo gravidade, foi terminada em 2009, mas continua ainda em período de investigação, Figura 2.12.



Figura 2.12: Vista aérea da barragem La Breña II próximo de Cordoba, Espanha - [35].

- Enciso em Espanha com cerca de 105 metros, prevê-se a sua conclusão para o final do ano de 2011, Figura 2.13.



Figura 2.13: Barragem de Enciso em fase de construção - [35].

2.2.2 Actualidade em Portugal

Em Outubro de 2007, foi lançado o Programa Nacional de Barragens de Elevado Potencial Hidroeléctrico (PNBEPH) numa tentativa do Governo Português reforçar a produção de energias renováveis e assim diminuir a dependência energética exterior. Visto Portugal ter um potencial hídrico por explorar dos maiores da União Europeia o PNBEPH traçou uma meta de aumentar a capacidade instalada hidroeléctrica nacional em 3000 MW até ao ano de 2020. Significando assim, a construção de 10 novos aproveitamentos hidroeléctricos apresentados na Figura 2.14 e fazer um reforço de potência noutros aproveitamentos já construídos [1].



Figura 2.14: Distribuição de barragens segundo o PNBEPH - [1].

Destes 10 aproveitamentos pelo menos um já foi decidido como barragem de gravidade de betão compactado com cilindros (BCC), é a do Alvito, situado no rio Ocreza, com cerca de 400 m de desenvolvimento no coroamento e 89 m de altura acima da fundação (Figura 2.15). Será equipada com um grupo reversível de 225 MW, iniciada em meados do presente ano e um investimento total de 360 milhões de euros.



Figura 2.15: Futura Barragem do Alvito - [33].

Por outro lado já em construção, mas sem estar directamente associado ao PNBEPH, está a barragem do Baixo Sabor, localizada no conselho de Torre de Moncorvo. Do seu projecto fazem parte dois escalões, um a montante e outro a jusante, a montante apresenta-se uma barragem abóboda de dupla curvatura com uma altura máxima de 123m e a jusante uma barragem de gravidade com uma altura máxima de 45m, esta ultima feita com recurso à técnica de betão compactado com cilindros e com um

descarregador de cheias e uma descarga de fundo instaladas. A sua construção foi iniciada em Junho de 2008, em Março deste ano iniciou-se a betonagem e prevê-se que em Agosto de 2014 já produza energia (Figura 2.16).

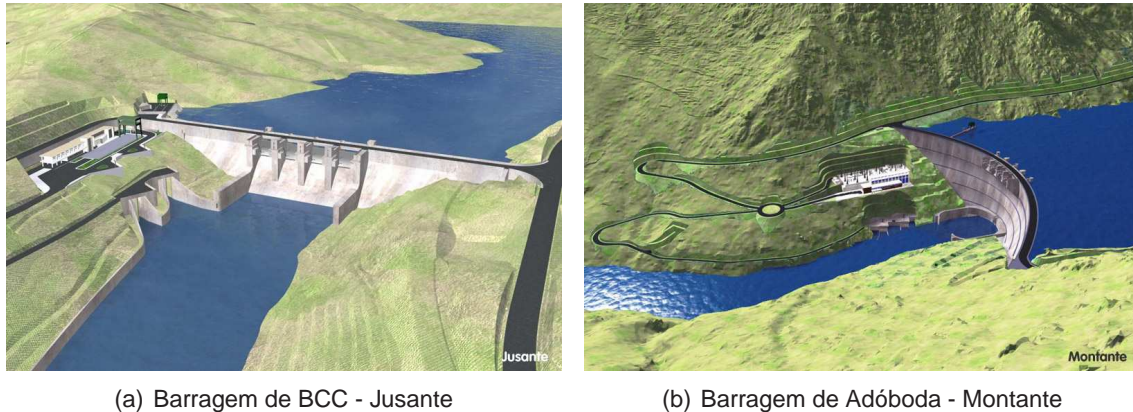


Figura 2.16: Barragens de Baixo Sabor - [33].

Neste caso, a barragem de BCC que está a jusante de uma outra principal de maiores dimensões, está a servir como contra-embalse, o que acontece em bastantes situações a nível mundial.

O contra-embalse está sempre associado a uma barragem a montante, assim, é a forma de transformar uma barragem em reversível, fazendo retornar à albufeira principal a água da barragem de jusante ou contra-embalse. Esta água que chega à barragem de jusante é sempre bombeada em período nocturno, ou seja, quando à pouca procura de energia eléctrica e normalmente é feita com recurso a energias renováveis, nomeadamente a eólica. Assim, esta água ao chegar de novo à albufeira principal pode ser turbinada novamente durante o dia gerando mais uma vez electricidade.

Em Portugal, a única barragem de betão compactado com cilindros já construída e em permanente funcionamento, também funciona como contra-embalse, é a do Pedrogão, localizada no rio Guadiana, a aproximadamente 24 km a jusante da barragem do Alqueva, constituindo assim o Sistema Alqueva-Pedrogão que procede alternadamente a turbinagem e bombeamento de água (Figura 2.17). Entrando em serviço no ano de 2004 com o aspecto da Figura 2.18.

2.3 O que é uma barragem de BCC

As barragens em BCC têm sido uma técnica desenvolvida por todo o mundo ao longo dos últimos 30 anos. Considerada uma técnica de grande inovação na aplicação a barragens, até chegar aos dias de hoje como uma técnica de qualidade e confiança comprovada, sendo acessível já a muitos projectistas e construtores. Em termos gerais é marcada pela sua construção simples e rápida que reduz assim os custos de construção. A tendência actual é de se padronizar tanto o seu projecto como a sua construção, como aconteceu com outros tipos de barragens de betão. Esta tendência é mais evidente nas áreas da definição da mistura a usar e também no controlo da temperatura ([10]).



Figura 2.17: Localização da albufeira do Pedrogão em relação a Alqueva - [27].



Figura 2.18: Barragem do Pedrogão - [27].

Na literatura consultada existem diferentes definições para um BCC aplicado a barragens, segundo as Normas de Construção de Barragens [3] é: "um betão seco, com abaixamento nulo, de modo a permitir que o equipamento de transporte e colocação, semelhante ao usado na construção de barragens de aterro, possa circular sobre o betão fresco.". De acordo com o American Concrete Institute [8] uma definição um pouco mais completa, é apresentada como um betão seco consolidado por uma vibração extremamente forte, constituído por agregados com diferentes granulometrias, ligantes, água e eventualmente adjuvantes; é usado um equipamento de alta capacidade de precisão no fabrico da mistura, depois é entregue o material em camiões ou tapetes rolantes, em seguida é aplicado por camadas usando bulldozers e por fim são compactadas cada camada com cilindros de compactação; é uma técnica que difere do betão convencional dado o diferente método de colocação.

2.4 Vantagens e Desvantagens do BCC

As vantagens do uso de BCC em barragens são bastante significativas, tal como as desvantagens devem ser identificadas e controladas. Assim, as vantagens passam sobretudo por dois factores que se relacionam e são sempre consequências um do outro, ou seja, o reduzido valor dos custos e a rapidez de construção. Estas duas vantagens estão presentes quando a técnica de barragens BCC é comparada com a construção de barragens de aterro ou barragens de betão convencional ([8] e [32]).

- É uma técnica de implementação rápida, dado que a sua construção é feita pela colocação de camadas sequenciais de material, originando elevadas taxas de produção na construção. Consequentemente, estas taxas significam o encurtamento do período de construção da barragem.
- Como o BCC é um betão mais seco usa menores quantidades de água, assim, também se permite um uso de uma menor quantidade de cimento na mistura, sendo essa quantidade de cimento substituída por outro material ligante que é muito mais competitivo em termos económicos. No fim da construção, dada essa poupança em quantidade de cimento constrói-se um betão bastante mais económico que o convencional.
- Quando se trata de dimensionar as condutas de derivação provisória do curso de água para a construção da barragem, dada a rápida construção da mesma usando BCC, pode-se afirmar que a probabilidade de uma enchente ocorrer é menor. Logo, estas condutas podem ser dimensionadas apenas para um pico de fluxo sazonal e não para picos de fluxo anuais, constituindo assim nova vantagem económica.
- Dado que os agregados usados neste betão podem ser muitas vezes encontrados nas imediações da construção da barragem, pode-se poupar significativamente em custos de transporte.
- É usada uma menor quantidade de cofragem em toda a sua construção em virtude da técnica usada, mas também às propriedades deste betão pouco trabalhável. Além disso na construção de juntas transversais não é usada qualquer tipo de cofragem.

- As barragens de aterro têm uma base de apoio bastante mais larga que as BCC o que lhes atribui uns custos de preparação das fundações muito maiores. E como é sabido as barragens de aterro não permitem o galgamento de água pela crista da barragem, mas as BCC permitem a instalação de órgãos hidráulicos como descarregadores de cheias e galerias como as barragens de betão convencional.
- É clara a economia de custos na conjugação dos vários pontos anteriores, e segundo [32] o custo de uma barragem construída em BCC pode ser de 25 % até 50% mais económica em comparação à construção de uma barragem de betão convencional. Igualmente, a conclusão de um projecto de uma barragem em BCC pode ser reduzida em vários meses, até anos quando comparada com um projecto em betão convencional.

Quanto às desvantagens associadas a este material, são relevantes por exemplo nos casos em que a de fundação está mais profunda e é necessária uma maior escavação de terreno, ou quando esta rocha não apresenta uma boa qualidade como fundação e assim poder originar assentamentos diferenciados excessivos. Pode ocorrer atrasos na sequência de colocação de camadas devido as condições meteorológicas e assim comprometer as taxas de produção. Devido a estas taxas de produção há um risco de um grande aumento da temperatura no interior da barragem e consequentemente provocar fissuração no betão, pelo que é muito importante desenvolver estudos térmicos e estruturais. Em conjugação com o risco de fissuração, este tipo de barragens também visa a construção de maiores quantidades de juntas, o que pode aumentar também o risco de percolação e assim a segurança e durabilidade da estrutura.

2.5 Materiais e Mistura do BCC

Os métodos de mistura aplicados ao BCC e os objectivos que este betão pretende são diferentes dos do betão convencional, é portanto necessária uma importante fase de investigação e selecção dos materiais, pois este betão precisa de alcançar uma trabalhabilidade e durabilidade adequada, visto requerer um determinado estado de consistência capaz de suportar cilindros vibratórios e outros equipamentos pesados que circulam sobre a mistura durante a execução da obra [32].

Quando se está em processo de escolha dos materiais cimentícios, deve-se ter em conta que estes afectam significativamente o desenvolvimento do calor de hidratação, bem como a resistência do betão final. Assim, são usadas pozolanas em substituição de maiores quantidades de cimento pois originam um calor de hidratação inferior em idades mais jovens. Bem como o cimento que é usado é preferencialmente de tipo II pela mesma razão.

Quanto aos agregados ou inertes devem ser também escolhidos consoante os objectivos de projecto da estrutura e devem ser usados tanto quanto possível o que se encontra perto do local de construção. Em termos de qualidade devem seguir os mesmos parâmetros que os betão convencional [8].

O uso de adjuvantes no BCC é extrema importância pois estes ajudam a reduzir a quantidade de água e aumentar o tempo de presa da mistura que até é o seu objectivo, por outro lado eles aumentam a trabalhabilidade do mesmo, o que já vai contra as suas especificações, assim os adjuvantes devem ser usados em dosagens bastante controladas. Para se ter uma ideia este betão quando sujeito ao ensaio Vêbê tem geralmente consistências de 10 a 20 segundos [32].

2.6 Propriedades do BCC endurecido

Na generalidade, o betão compactado com cilindros depois de ter sido colocado e estar endurecido possui as mesmas propriedades que o betão convencional. Estas propriedades são definidas de acordo com as exigências de projecto de estrutura, no entanto todas elas são influenciadas sempre por factores como o transporte, colocação e compactação da mistura.

Como propriedades relevantes para o estudo de um betão BCC enumeram-se:

- Características Mecânicas
 - Resistência à Compressão
 - Resistência à Tração
- Características Elásticas ou de Deformabilidade
 - Modulo de Elasticidade
 - Coeficiente de Poisson
 - Fluência
- Durabilidade
- Propriedades Térmicas

As propriedades dos betões são obtidas realizando ensaios a provetes com o mesmo material usado em obra e usando as mesmas especificações que em construção. Além disso, no caso do BCC também são extraídos carotes da obra para se proceder ao seu ensaio, comparando as suas características com os ensaios de laboratório e frequentemente se verificam resultados diferentes entre os dois ensaios. Em Portugal, segundo [3], antes do início da construção de uma barragem em BCC é executado um bloco experimental, não incorporado com a barragem destinado só à realização de ensaios. Aqui são já utilizados os equipamentos de fabrico, colocação e compactação a usar na construção da barragem.

À medida que sejam explanadas as diferentes propriedades relevantes de um betão BCC, serão também referidas as propriedades para o caso específico em estudo no presente trabalho, a barragem do Pedrogão. Varias destas propriedades foram levantadas por técnicos do LNEC para a elaboração de um relatório do estudo e controlo da qualidade do betão para a barragem do Pedrogão. Este relatório foi feito em parceria com a EDIA - Empresa de Desenvolvimento e Infra-Estruturas do Alqueva, S.A. e engloba a fase de acompanhamento da execução do betão em obra [27].

2.6.1 Características Mecânicas

Enquanto o betão usado em barragens de gravidade terá tensões instaladas relativamente baixas, o contrário já se verifica quando é usado em estruturas de elevada altitude ou do tipo arco-gravidade, exigindo assim uma resistência às tensões muito mais elevada. No caso de barragens de gravidade as tensões também podem ser elevadas quando existem variações de temperatura [28]. Por isso, são de grande importância os estudos térmicos e estruturais realizados a este tipo de barragens ainda na fase de estudo ou projecto.

Resistência à Compressão

Para aferir os valores de resistência à compressão são realizados os ensaios típicos à compressão em laboratório. Seja de provetes feitos no mesmo local ou por meio de carotes extraídos em obra. É um ensaio que se faz com regularidade durante a obra, para ir aferindo a qualidade do betão em obra e confirmar se vão de encontro às resistências especificadas em projecto.

A resistência à compressão é dependente da quantidade e tipo de materiais cimentícios (ligantes), a qualidade e granulometria dos agregados, do grau de compactação obtida e da idade ([32] e [28]).

Das propriedades referidas, uma bastante característica do betão BCC é o uso de uma menor quantidade de ligante em comparação com o betão convencional. Nas Figuras 2.19 e 2.20 pode-se perceber como é que a resistência à compressão se relaciona com a quantidade de ligante utilizada na mistura e além disso a relação com a idade do betão: 7 dias, 28 dias, 90 dias e 365 dias.

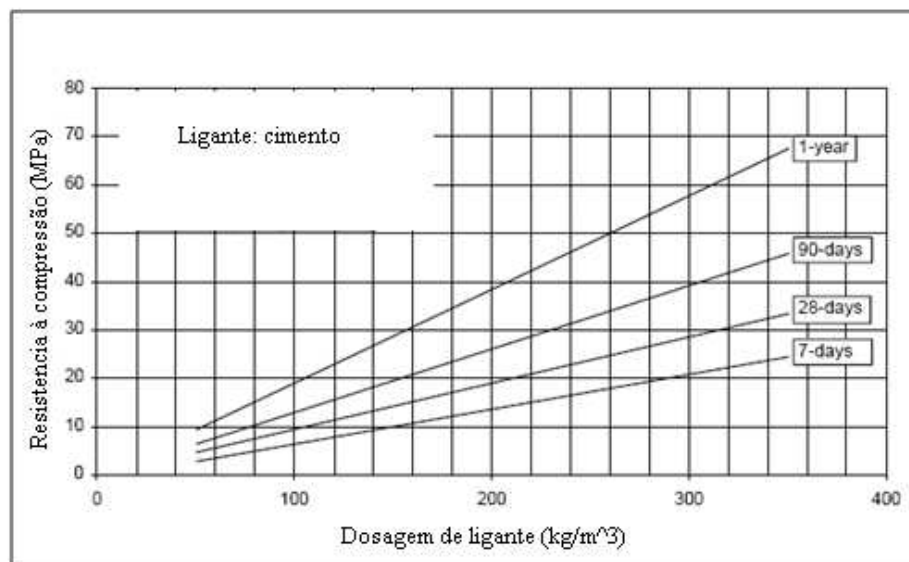


Figura 2.19: Relação dosagem de cimento (kg/m^3) e resistência à compressão (MPa) - [8].

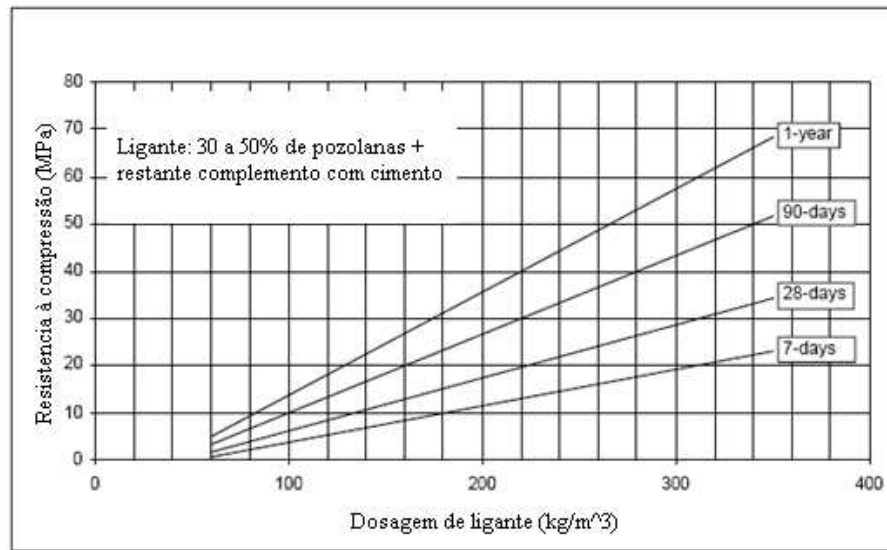


Figura 2.20: Relação dosagem de cimento com pozzolanas (kg/m^3) e resistência à compressão (MPa) - [8].

Na Figura 2.19, o betão BCC foi formulado apenas com o ligante cimento, já na Figura 2.20, o betão BCC usou como ligante cimento e pozzolanas, sendo estas últimas cerca de 30% a 50% do material ligante. É visível nas duas figuras que conforme o betão tem mais idade, maior a resistência que adquire. Também se pode observar que para betões com pouca dosagem de ligante os que adquirem maiores resistências à compressão são os que usam apenas cimento como ligante, já os betões com boa dosagem de ligante obtêm sensivelmente as mesmas resistências à compressão quer usem como ligante só cimento ou também alguma quantidade de pozzolanas.

Para o caso da barragem de Pedrogão em estudo no presente trabalho, os resultados da resistência à compressão média para o betão usado em maior quantidade [27] são os discriminados na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Resultados da resistência à compressão média para diferentes idades do betão - BCC2

(MPa)	R7 dias	R28 dias	R56 dias	R90 dias	R180 dias	R365 dias
Resist. à Comp.	3.5	6.4	8.8	11.8	15.8	17.8

Resistência à Tracção

A resistência à tracção é uma propriedade característica de qualquer tipo de betão, embora no cálculo de estruturas de betão simples ou betão armado seja usual desprezar a resistência à tracção do betão [28], neste tipo de estruturas em BCC torna-se bastante mais significativa.

A resistência à tracção de um betão BCC é necessária ser conhecida não só para fins

de projecto, mas também dadas as cargas dinâmicas que este betão sofre e também as análises térmicas a que deve ser sujeito [8]. Como cargas dinâmicas podem-se enumerar os carregamentos sequenciais das camadas, as variações da temperatura ambiente, o carregamento da água no paramento de montante aquando da entrada em serviço da estrutura e até durante a ocorrência de um sismo. Factores estes que influenciam bastante as tensões de tracção instaladas na estrutura. Estas tensões de tracção instaladas devido a deformações impostas também dependem de propriedades como o modulo de elasticidade à tracção e da relaxação do betão, sendo que a fissuração só ocorre quando é atingida a tensão de rotura do betão [28].

Nos trabalhos [16] e [18], foi identificada uma relação directa entre a variação de temperaturas no interior de uma barragem e as tensões de tracção sofridas, onde estas ultimas são mais elevadas quanto maior for a libertação de calor de hidratação. Da mesma forma as tensões vão diminuindo conforme a temperatura da barragem diminui ao longo do tempo.

Em termos de ensaios laboratoriais, a resistência à tracção pode ser determinada de modo directo ou por meio de ensaios de resistência em compressão diametral, sendo que neste caso a resistência à tracção é cerca de 5 a 15% do valor de resistência à compressão diametral obtida no caso de misturas de betão BCC. O valor desta resistência depende essencialmente da qualidade dos agregados, da idade do betão, da dosagem de ligante e das condições de junta quando da colocação das camadas [8].

Tal como a resistência à compressão, quanto menor a quantidade de cimento como ligante, ou uma baixa qualidade nos agregados, traduz-se numa resistência à tracção directa também inferior. No trabalho [28], a resistência à tracção directa de carotes extraídas de obras de BCC variou entre os 0.5 e os 2.5 MPa , onde os valores mais altos eram aqueles onde se usava uma maior quantidade de cimento na pasta.

No caso do BCC, dado que é feita uma construção por camadas, as juntas de ligação entre camadas são pontos críticos a ter atenção, estando a resistência à tracção directa dependente da forma como estas juntas são tratadas e preparadas antes de receber uma nova camada, ou do grau de compactação e segregação da superfície da camada. Assim, sempre que não existir um cuidado na limpeza desta superfície, uma baixa consolidação ou ambas, pode diminuir drasticamente a respectiva resistência à tracção directa. Pode afirmar-se portanto que estas juntas de ligação são consideradas os pontos mais fracos nas construções em BCC [32].

Para o caso da barragem de Pedrogão em estudo no presente trabalho, os resultados da resistência à compressão média para o betão BCC2 são os discriminados na tabela 2.2, retirado de [27].

Tabela 2.2: Resultados da resistência à tracção média para diferentes idades do betão - BCC2

(MPa)	R56 dias	R365 dias
Resist. à Tracção.	0.93	1.69

2.6.2 Características de Deformabilidade

Módulo de Elasticidade

Este valor é matematicamente definido como a razão entre a tensão normal e a extensão correspondente, em compressão ou tracção, no caso do regime elástico, conforme apresentado na equação 2.1.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

O módulo de elasticidade é um parâmetro típico em qualquer análise de tensões, fazendo assim parte essencial das análises estruturais que possam ser feitas a um qualquer betão BCC aplicado a barragens. Normalmente, betões com maiores resistências mecânicas mostram uma correlação com módulos de elasticidade também superiores, embora o módulo de elasticidade não seja directamente proporcional à resistência, pois esta também é influenciada pelo módulo de elasticidade do agregado [7]. Assim, apesar da relação expressa na equação 2.1, o comportamento do betão não é linear, sendo que uma das razões que contribui para este fenómeno é o facto do betão ser um material heterogéneo.

Esta propriedade do betão depende de vários factores, entre eles distinguem-se a sua idade, o tipo de agregados que o constituem e a dosagem de ligante usada na sua mistura, aumentando com a idade à semelhança dos betões convencionais [8] e conforme presente na tabela 2.3. Em geral, o módulo de elasticidade de um betão convencional com a mesma idade de um betão BCC, é que este último é inferior, pois normalmente para um BCC são usadas menores quantidades de ligante na mistura, além de poderem ser usados agregados de menor qualidade, obtendo-se como consequência novamente betões BCC com baixo módulo de elasticidade. Segundo [32] um baixo valor de módulo de elasticidade é geralmente benéfico na redução de tensões de compressão e tracções aparentes no betão.

Para o caso da barragem de Pedrogão em estudo no presente trabalho, os valores do módulo de elasticidade o betão BCC2 estão discriminados na tabela 2.3, retirado de [27].

Tabela 2.3: Resultados dos módulos de elasticidade média para diferentes idades do betão - BCC2

(GPa)	R56 dias	R365 dias
Modulo de Elasticidade	21.2	25.7

Coefficiente de Poisson

O coeficiente de poisson de um material é dado pela relação entre a extensão transversal e a extensão longitudinal que resulta de uma tensão axial simples, em fase elástica. Este parâmetro revela-se muito idêntico no betão convencional e no BCC, apresentando valores entre 0.17 e 0.22 segundo [32].

Para o caso da barragem de Pedrogão em estudo no presente trabalho, foi assumido um valor de coeficiente de poisson de 0.2, conforme considerado no trabalho [17].

Fluência

Define-se a fluência como uma deformação que ocorre ao longo do tempo no betão quando este é sujeito a uma tensão constante. No caso das barragens em geral, esta tensão constante pode ser identificada como a tensão que a água exerce no paramento de montante já na fase de serviço da estrutura. Por vezes esta propriedade está relacionada com outro fenómeno, a relaxação, sendo esta a diminuição da tensão, sob deformação constante ao longo do tempo.

A fluência no BCC, tal como em outras estruturas de betão, é função dos materiais constituintes do betão, da idade em que ocorrem os primeiros carregamentos, das temperaturas ambientais existentes e das propriedades dos materiais constituintes. Segundo [32], esta propriedade apresenta menores valores, quando o betão tem valores mais elevados de módulo de elasticidade e de resistência à compressão.

2.6.3 Durabilidade

O BCC, tal como as outras estruturas de betão, têm o dever de se manterem integras durante o seu período de vida útil, sabendo que existe sempre um potencial de deterioração devido aos efeitos das acções ambientais, ataque químico ou abrasão. Assim, a durabilidade do BCC depende da energia de compactação, da quantidade de ligantes utilizados, da qualidade dos materiais e da percentagem de compactação. Quando são usados agregados duros e densos bem como uma adequada selecção do tipo e quantidade dos ligantes, o BCC pode apresentar uma boa resistência à abrasão e erosão [32].

Visto que na água do paramento de montante de uma barragem podem estar dissolvidas substâncias químicas ou simples lixivianos, podem afectar directamente a durabilidade da estrutura, sendo a permeabilidade da estrutura um parâmetro de grande relevância, pois se a mistura de betão tiver baixo teor de ligantes a permeabilidade será elevada e a resistência diminui comprometendo a durabilidade.

Para uma boa protecção da estrutura, no caso de serem usadas misturas interiores pobres, pode ser feito um revestimento exterior com misturas com maior percentagem de ligantes, como o betão convencional. Caso disso é a barragem portuguesa de BCC em Pedrogão.

Os ciclos de gelo-degelo também podem causar a degradação do betão, provocadas por variações de temperatura acabando por ocorrer destacamento do betão superficial. Este fenómeno ocorre em locais onde durante o ano é frequente existirem temperaturas inferiores a 0°C. Em Portugal, os locais onde isto pode suceder e ao mesmo tempo existem estruturas de BCC são muito poucas, logo este problema não é muito relevante [28].

2.6.4 Propriedades Térmicas

Inicialmente é importante perceber de que forma é que uma barragem de betão é influenciada por fenómenos térmicos, pois as propriedades térmicas mais relevantes

surgem de variações de temperatura que ocorrem durante a construção e período de vida útil da barragem. Assim, na Figura 2.21 mostram-se as principais formas de transferência de calor numa barragem de gravidade de betão. Podem facilmente ser agrupados os efeitos térmicos internos, como o calor de hidratação e externos, como os efeitos da temperatura ambiente, do reservatório, das fundações e até a radiação solar.

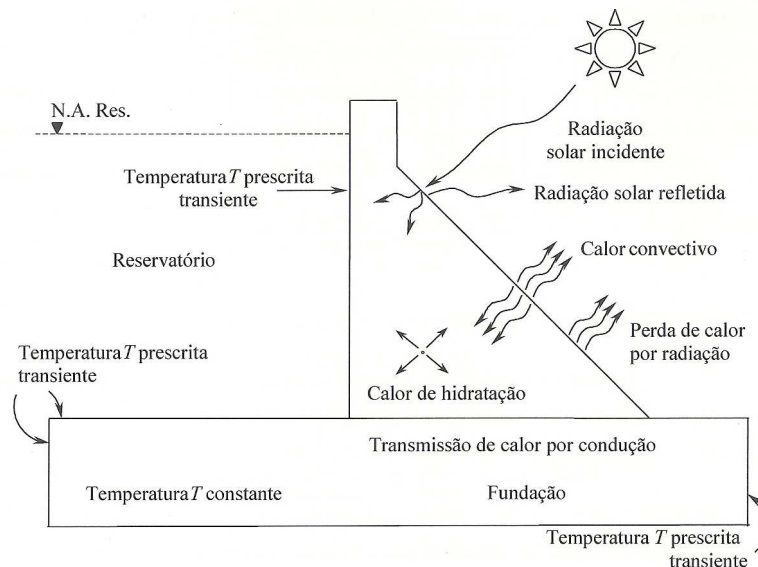


Figura 2.21: Modos de transferência de calor numa barragem de betão - [16].

Como consequência dos efeitos térmicos descritos anteriormente, pode ocorrer no corpo da barragem variações de volume ou de forma e assim originam-se tensões térmicas. Quando essas tensões excedem a resistência à tracção dá origem a fissuração no betão ou por outro lado se excederem a resistência à compressão pode ocorrer o esmagamento do betão, resultando em ambos os casos numa deterioração da barragem e em casos extremos um comprometimento da sua segurança estrutural. Importa saber que na estrutura da barragem existem restrições internas e externas que restringem a variação volumétrica da barragem. As externas são essencialmente junto à fundação que não acompanham as variações de volume. As internas ocorrem quando o betão endurece e surgem gradientes térmicos entre a superfície e o interior da peça, mais uma vez dificultando as variações de volume [16] e [15].

Para que se faça um bom controle da fissuração, devem ser feitas análises térmicas que possam analisar desde as propriedades térmicas do betão, passando pelo ritmo de construção na colocação de camadas e altura das mesmas, até às condições de temperatura ambientes que se façam sentir no momento da construção e durante o período de vida útil da estrutura [18].

Uma das propriedades térmicas mais importantes a ter em conta na construção de uma estrutura BCC é a elevação adiabática da temperatura do betão, pois é uma reacção química derivada da hidratação do cimento, reacção essa do tipo exotérmica e por

isso está relacionada com a quantidade de calor gerada pelo betão. Esta propriedade é função da quantidade, composição, finura e temperatura de hidratação do cimento utilizado, como se prova pela Figura 2.22, pois compara-se o calor de hidratação de uma mistura de um betão convencional usando apenas cimento Portland (azul), com uma mistura de um BCC que na sua constituição tem uma menor percentagem de cimento Portland complementando-se com cinzas volantes (laranja). Claramente se percebe que usando uma menor quantidade de ligante no betão, menor será o calor de hidratação libertado e assim uma vantagem na construção de uma barragem em BCC, pois assim, podem-se aumentar as taxas de construção, colocando camadas de betão num menor espaço de tempo [16].

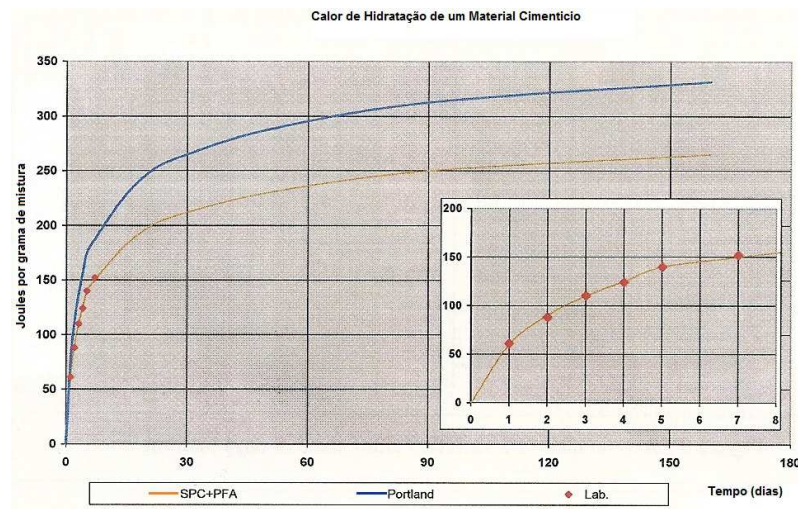


Figura 2.22: Curva do calor de hidratação para diferentes materiais cimentícios, adaptado de [12].

Poucas são as equações apresentadas na literatura que definem o calor de hidratação para determinadas misturas cimentícias, mas como cada projecto obedece a diferentes exigências, cada mistura proposta deve ser alvo de ensaios em laboratório para a determinação da sua função de calor de hidratação [32]. Na literatura consultada encontraram-se estas equações em [29] e [26] e, segundo [9], o processo para a obtenção das equações de calor de hidratação do cimento por via experimental é dispendioso e nunca com total rigor, pois é impossível recriar condições totalmente adiabáticas.

Da reacção exotérmica que acontece devido à hidratação do cimento, gera-se um elevado gradiente térmico entre o núcleo da estrutura de uma barragem e a superfície da mesma. Sendo no núcleo da barragem onde se acumula maiores valores de temperatura. Esta temperatura vai diminuindo ao longo do tempo, podendo demorar alguns anos até estabilizar completamente [18].

O coeficiente de dilatação térmica também é uma propriedade importante no estudo térmico-mecânico. Definindo-se como a variação por unidade de comprimento que um material sofre devido a uma variação unitária de temperatura e tal como noutras propriedades térmicas o tipo de inerte tem uma enorme influência, neste caso esta

propriedade do betão depende em cerca de 80% do coeficiente de dilatação térmica do inerte [28]. Deve-se por isto em fase de projecto escolher um inerte com baixo valor de coeficiente de dilatação térmica, contribuindo assim para evitar o aparecimento de fissuração.

O calor específico é a quantidade de calor necessária para elevar em um grau a temperatura de uma unidade de massa de um material. Como noutras propriedades é função do calor específico do inerte, mas não varia muito entre o betão convencional e o BCC [28].

A condutibilidade térmica (k) define-se como a quantidade de calor que passa perpendicularmente através da unidade de superfície de um material, por unidade de tempo, quando existe uma diferença de temperatura unitária entre essa superfície e outra igual afastada de uma distância unitária [28]. Esta propriedade será mais amplamente explicada no Capítulo 3. A condutibilidade térmica relaciona-se com a difusibilidade conforme a equação 2.2:

$$h^2 = \frac{k}{\rho c} \quad (2.2)$$

Sendo h^2 a difusibilidade, ρ a massa volumica e c o calor específico.

Além das propriedades térmicas do betão, devem-se ter em conta os períodos anuais em que se realizam as construções em betão e em particular no BCC, pois as temperaturas médias sazonais variam bastante e com isso podem fazer variar a temperatura de colocação do betão, influenciando à partida a temperatura em que ocorre a hidratação do cimento. Também existem as oscilações diárias da temperatura ambiente, bem como as condições climáticas, tendo normalmente comportamentos cíclicos. Por ser complicada a conjugação de todas estas variações de temperatura ambiente, podem ser empregues valores médios para o período em análise [32].

2.7 Considerações de Construção e Projecto

No decorrer deste trabalho, varias vezes é referida a vantagem da velocidade de construção quando se aplica um BCC em barragens. Para esta vantagem ser considerável devem ser rentabilizadas ao máximo as capacidades de organização e produção do betão no estaleiro, para que nesse seguimento seja aplicado o betão de acordo com as decisões de projecto com o mínimo de atrasos.

As barragens de betão convencional são construídas por blocos, permitindo que os trabalhos sejam divididos e dirigidos de forma independente entre eles. Ao contrario, as barragens de BCC que ao serem construídas de forma constante e ininterrupta têm que obedecer a um planeamento e coordenação eficaz entre a sua produção, transporte e colocação.

Para que uma produção de betão deva ser feita de forma continua, deve haver um eficaz planeamento da disposição do local de fabrico e o local de depósito de agregados.

Considera-se que uma localização em planta adjacente a ambos, minimiza o transporte dos componentes de betão e reduz o número de equipamentos utilizados [8].

Dado a exigência de uma elevada produção contínua de misturas, é imprescindível ter um equipamento não só que o faça, mas também produza sempre misturas de boa qualidade. É o caso das misturadoras contínuas do tipo pugmill, frequentemente usadas nas barragens de BCC, conforme o esquema da Figura 2.23.

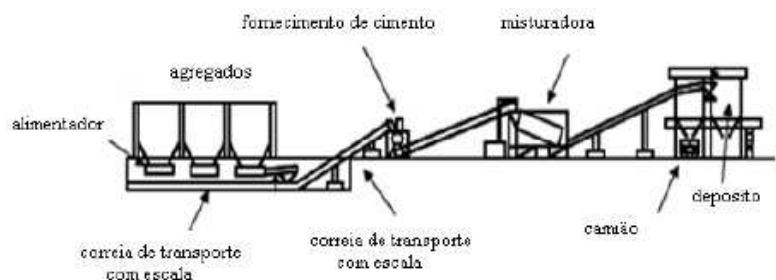


Figura 2.23: Esquema de misturadora contínua, adaptado de [24].

Segundo as normas [3], na altura do lançamento de uma camada de regularização em betão convencional ou BCC, a fundação deve apresentar toda a sua superfície limpa e isenta de impurezas, para que a ligação do betão ao maciço rochoso seja a melhor possível.

Outro aspecto a ter em consideração na organização de um estaleiro, são os acessos para a circulação de equipamentos sem congestionamentos, garantindo-se uma rápida, eficaz e segura circulação. A superfície destes acessos deve estar sempre o mais limpa possível, sem óleos ou vegetação que possam colocar-se nos rodados dos equipamentos de transporte e consequentemente contaminar as superfícies da camada sobre a qual o BCC será depositado [32].

Ao mesmo tempo o transporte entre o local da fabricação da mistura e a sua colocação deve ser o mais rápida possível, visto que quanto maior o tempo de exposição menor é o grau de compactação devido aos processos de secagem atmosféricos. Segundo [8], este tempo entre o fabrico e a colocação da mistura não deve exceder os 45 minutos.

Existem duas formas essenciais para o transporte da mistura. Uma é o transporte de forma directa com recurso a camiões semelhantes aos usados no transporte de solos, a outra é uma forma contínua em tapetes rolantes conforme a Figura 2.24. Quase sempre são usadas estas duas formas em conjunto, tendo o nome de transporte misto. Como aconteceu no caso português da barragem do Pedrógão.

Em seguida para a colocação da mistura, a descarga do equipamento de transporte deve ser feita cuidadosamente para evitar a segregação e no passo seguinte é feito o espalhamento. O espalhamento tem a importante função de redistribuir os componentes da massa do betão, de forma a que se corrija uma eventual segregação do betão e evitar a formação de juntas verticais, que proporcionam locais mais susceptíveis de percolação



Figura 2.24: Transporte da mistura através de tapetes rolantes na barragem de Breña, em Espanha [35].

da água. Ao longo do tempo com a experiência ganha nestas construções, foi decidido fazer um espalhamento de forma a que cada camada tenha 300mm de espessura, pois é a considerada ideal para fazer uma adequada compactação.

Na Figura 2.25, mostra-se a sequência típica de colocação, espalhamento e compactação de uma mistura de BCC.

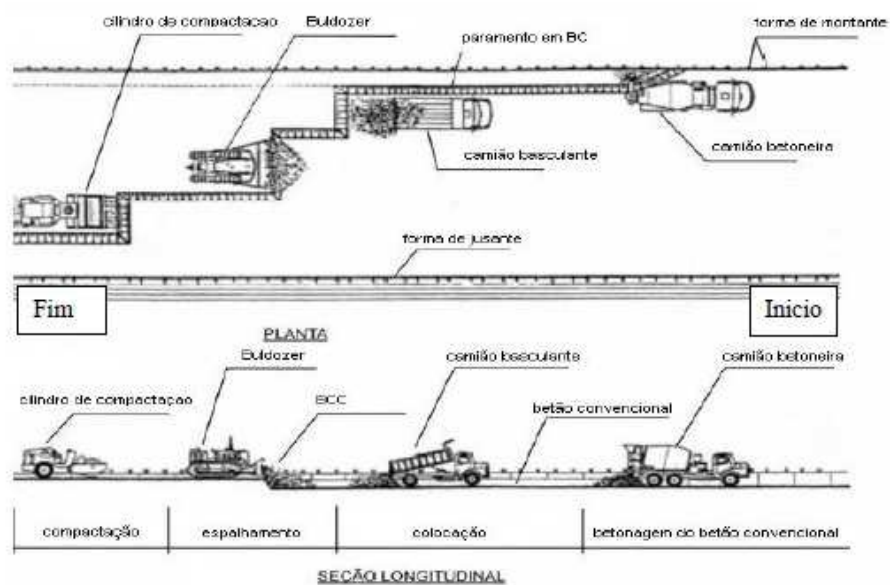


Figura 2.25: Etapas de colocação do BCC em obra, adaptado de [23].

Para efectuar o espalhamento podem ser utilizados tractores tipo bulldozer ou até retroescavadoras. Na fase seguinte de compactação os equipamentos mais utilizados são os cilindros rasadores de rasto liso. Para este último caso não existe nenhuma

norma, mas a velocidade de circulação não deve exceder os 1 a 2 km/h e a última passagem deve ser efectuada sem vibração para regularizar a camada [23]. Já o número de passagens pode rondar entre as 4 e as 6, dependendo do definido na plataforma experimental [8]. Um maior número de passagens pode ser prejudicial, pois pode causar o esmagamento dos agregados, ou uma maior secagem à superfície.

A cura é a fase que se segue à compactação e antecede a colocação de outra camada, tem por objectivo atrasar a formação de uma junta fria entre camadas. O processo de cura usa nebulizadores ou aspersores com água, devendo ter o cuidado para não encharcar a camada [8].

Na construção sequencial por camadas, inevitavelmente são criadas juntas horizontais entre duas camadas sucessivas. É fundamental perceber que a ligação entre camadas de betão é um aspecto crítico para o bom comportamento das barragens BCC.

Segundo [30] as juntas classificam-se entre quentes e frias. As juntas quentes são as que se formam quando a colocação do BCC é continua, não tendo a camada anterior formado presa antes da colocação da camada seguinte. Este tipo de junta é a ideal pois não necessita de qualquer tratamento, deve-se apenas garantir a limpeza da superfície da camada já compactada. Já a junta fria é aquela que se forma quando a camada seguinte só é colocada uma série de horas depois da primeira. Este número de horas depende de cada projecto e no caso da barragem do Pedrógão foi determinado que até 15 horas depois de ser colocada uma camada e se a temperatura se mantivesse próxima de quando ocorreu a colocação, bem como uma superfície sempre húmida, seria considerada uma junta quente [27].

Já no caso de ultrapassar as 15 horas, seria considerada uma junta fria e além da superfície ter que ser limpa, deveria-se aplicar uma calda de cimento na camada já compactada por forma a promover uma boa ligação da camada sucessiva.

São características das barragens BCC a formação de juntas verticais de contracção. Tendo um papel importantíssimo no controlo de possíveis fissuras que podem ocorrer no corpo da barragem dado os gradientes térmicos que se fazem sentir. Estas juntas dividem a estrutura em blocos e assim, evitam ou minimizam o aparecimento de fissuras térmicas na direcção de montante-jusante [8].

Estas juntas podem ser formadas já quando a camada foi compactada, introduzindo chapas metálicas ou plásticas (Figura 2.26) que interrompem a continuidade da camada e ajudam a dissipar o calor de hidratação gerado, diminuindo os efeitos desde. Ao cortar as ligações entre camadas aumenta-se o grau de liberdade de deformação da estrutura.

O número de juntas de contracção a efectuar é determinado pelo projectista, com base em estudos térmicos que prevêem a fissuração com base em modelos de cálculo para cada estrutura e condições locais da obra [32].



Figura 2.26: Cravação de chapas para criação das juntas transversais [27].

Capítulo 3

Problema Térmico

3.1 Generalidades sobre transferências de calor

No estudo de qualquer estrutura de betão tem que se ter em conta o facto de este sofrer uma reacção exotérmica de libertação de energia, em concreto libertação de calor, especialmente em grandes estruturas de betão como é o caso de barragens quer sejam de betão convencional ou de BCC. Além deste fenómeno de libertação de calor, que é propriedade intrínseca de cada tipo de betão, existem ainda diferentes formas em como uma estrutura de betão interage com o meio envolvente, já demonstrado no Capítulo 2 na Figura 2.21, para o caso de uma barragem.

Dado que todas estas formas de transferência de calor podem actuar em conjunto, existe o interesse em utilizar um modelo numérico que simule o comportamento térmico do betão durante a actuação de todos estes fenómenos, em particular para a hidratação do cimento no betão e o seu arrefecimento.

Na determinação destes modelos numéricos é necessário todo um conhecimento inicial sobre os modos de transferência de calor:

- Condução
- Convecção
- Radiação

A transferência de calor pode ocorrer num sólido, líquido ou gás e ocorre sempre que há diferenças de temperatura. Existem sempre variações de energia térmica, sempre que houver diferenças de temperatura. Sabendo que esta energia térmica move-se sempre de regiões de elevada temperatura, para regiões de baixa temperatura, até ser atingido um equilíbrio térmico [31].

Além dos modos de transferência de calor deve ser considerado como ocorre o processo de transferência. Este processo divide-se em regime estacionário ou permanente e transiente. No regime estacionário, não existe variação de energia interna e assim o fluxo de calor não varia com o tempo, é constante, mas a temperatura pode ser diferente em cada ponto da estrutura. Já no regime transiente, existe uma variação da energia interna e assim a temperatura em cada ponto varia com o tempo.

3.2 Modos da Transferência de Calor

3.2.1 Condução

Segundo [31], a condução "é o fluxo de calor numa substância (sólido, líquido ou gás) devido á troca de energia entre moléculas que têm maior energia com as que têm menos energia"

Lei de Fourier - Condução de Calor

Admitido que se tem um certo material (Figura 3.1), por exemplo um sólido, onde existem variações de temperatura nesse material, sabe-se que a temperatura fluirá no sentido decrescente da temperatura.

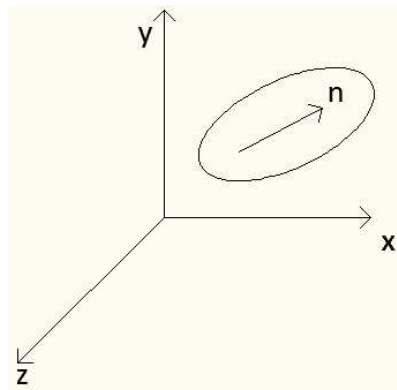


Figura 3.1: Exemplo de um material, com um vector unitário \vec{n} que determina a sua direcção - [31].

A Lei de Fourier determina que o fluxo de calor por condução numa direcção arbitrária \vec{n} é proporcional ao gradiente de temperatura naquela direcção [31].

$$\frac{q}{A} \propto \frac{dT}{dn} \quad (3.1)$$

Removendo o sinal de proporcionalidade vem:

$$\frac{q}{A} = -k \frac{dT}{dn} \quad (3.2)$$

O gradiente de temperatura é multiplicado por uma constante de proporcionalidade k que é a condutividade térmica do material, e é adoptado o sinal negativo, pois o calor flui no sentido da decrescente da temperatura e assim para o calor fluir positivo na direcção positiva de n é necessário colocar este sinal negativo. É uma convenção adoptada por todos os autores da literatura [31], [6]. Esta condutividade térmica pode ser traduzida como a medida da habilidade que um material tem em conduzir o calor.

Em termos de unidades:

- $\frac{q}{A}$ um fluxo de calor por área vem em $\frac{W}{m^2}$

- $\frac{dT}{dn}$ um gradiente de temperatura segundo uma direcção vem em $\frac{K}{m}$
- k a condutibilidade térmica vem em $\frac{W}{mK}$

Esta lei pode ser apresentada em forma de coordenadas cartesianas da seguinte forma:

$$\left(\frac{q}{A}\right)_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.3)$$

$$\left(\frac{q}{A}\right)_y = -k \frac{dT}{dy} \quad (3.4)$$

$$\left(\frac{q}{A}\right)_z = -k \frac{dT}{dz} \quad (3.5)$$

Também se pode apresentar em coordenadas cilíndricas ou esféricas, caso trabalharmos com um objecto com essa geometria. Mas de forma idêntica em todos os sistemas de unidades a condutibilidade térmica é sempre k o que pressupõe estarmos na presença de um material isotrópico, ou seja, que tem propriedades iguais em todas as direcções, neste caso particular é o calor que percorre de forma idêntica nas direcções x , y e z . No entanto, deve-se salvaguardar a existência de materiais em que o k pode ser diferente em todas as direcções - material não isotrópico.

Em geral para materiais/meios sólidos e líquidos:

- $k = f(T)$, função da temperatura

E para gases:

- $k = f(p, T)$, função da pressão e da temperatura

É de realçar que em muitas aplicações a variação de k com a temperatura é muito pequena, logo o que se faz é admitir um determinado k constante que corresponde a uma temperatura média nessa situação particular.

Para se compreender melhor é importante ter sensibilidade quanto aos valores de condutibilidade térmica de diferentes materiais (Tabela 3.1).

Pela Tabela 3.1, é possível distinguir um grande intervalo de valores de k , para os metais quanto mais puros maior a sua condutibilidade térmica.

Quando se pretende resolver problemas em que a temperatura varia em mais do que uma direcção e também com o tempo, é necessário desenvolver uma equação diferencial geral para a condução de calor.

Esta derivação será feita em coordenadas cartesianas e é assumido que:

1. O material é isotrópico e homogéneo,
2. Este material pode gerar calor e a taxa de geração de calor é \bar{q} em W/m^3 . Esta taxa de geração de calor pode ser uma constante, se o calor for gerado de forma uniforme, ou pode variar de lugar para lugar, sendo uma função de x , y e z ou função de x , y , z e t (tempo).

Tabela 3.1: Valores representativos de condutibilidade térmica de alguns materiais - [31]

	Condutividade térmica (W/mK)	Temperatura
Sólidos: Metais		
Cobre puro	380	20°C
Aço (0,5% C)	54	20°C
Aço inoxidável	18	20°C
Não metais		
BC -betão convencional	2.0	-
Plástico	0.58	20°C
Madeira	0.17	20°C
Líquidos		
Água	0.6	20°C
Óleo	0.14	20°C
Gases		
Ar seco	0.026	1 bar, 20°C
Vapor	0.025	1 bar, 20°C

Pegando num elemento diferencial de um sólido (Figura 3.2), localizado arbitrariamente dentro deste e com a Lei de Fourier faz-se a seguinte derivação:

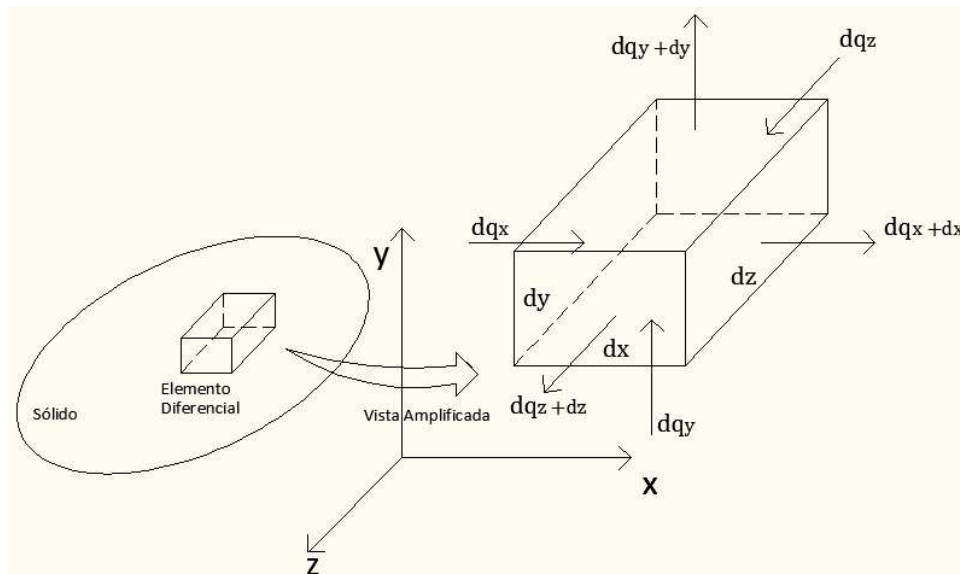


Figura 3.2: Elemento diferencial contido num sólido em coordenadas cartesianas - [31].

$$dq_x = -k \frac{dT}{dx} \cdot dy \cdot dz \quad (3.6)$$

Sendo:

- dq_x - calor que flui na face x ,
- $-k \frac{dT}{dx}$ - calor que flui na direcção positiva

- $dy \cdot dz$ - área da face x.

$$dq_{x+dx} = - \left\{ k \frac{dT}{dx} + \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) dx \right\} \cdot dy \cdot dz \quad (3.7)$$

Analogamente:

$$dq_y = -k \frac{dT}{dy} \cdot dx \cdot dz \quad (3.8)$$

$$dq_{y+dy} = - \left\{ k \frac{dT}{dy} + \frac{d}{dy} \left(k \frac{dT}{dy} \right) dy \right\} \cdot dx \cdot dz \quad (3.9)$$

$$dq_z = -k \frac{dT}{dz} \cdot dx \cdot dy \quad (3.10)$$

$$dq_{z+dz} = - \left\{ k \frac{dT}{dz} + \frac{d}{dz} \left(k \frac{dT}{dz} \right) dz \right\} \cdot dx \cdot dy \quad (3.11)$$

A quantidade de calor que é transferida através do elemento, $dx \cdot dy \cdot dz$, por unidade de tempo é:

$$= (dq_x + dq_y + dq_z) - (dq_{x+dx} + dq_{y+dy} + dq_{z+dz}) \quad (3.12)$$

$$\left\{ \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(k \frac{dT}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(k \frac{dT}{dz} \right) \right\} dx dy dz \quad (3.13)$$

A quantidade de calor gerado no elemento por unidade de tempo é:

$$= \bar{q} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (3.14)$$

A taxa de variação de energia do elemento é:

$$= (\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz) C_p \frac{dT}{dt} \quad (3.15)$$

Sendo:

- $\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz$ - a massa do elemento,
- C_p - o calor específico do material

Aplicando a 1ª Lei da termodinâmica a este sistema fechado, ou seja, ao elemento $dx dy dz$ da Figura 3.2 vem:

$$(3.13) + (3.14) = (3.15) \quad (3.16)$$

E resolvendo a equação 3.16 temos de forma simplificada a equação diferencial:

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(k \frac{dT}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(k \frac{dT}{dz} \right) + \bar{q} = \rho C_p \frac{dT}{dt} \quad (3.17)$$

Em suma, esta é a equação diferencial geral para um material homogéneo, estando a trabalhar no sistema de coordenadas cartesianas. T é um campo de temperaturas $T = T(x, y, z, t)$ e pode existir geração de calor dado por \bar{q} , que pode variar ou pode ser constante como atrás referido.

Para o caso em que o material é isotrópico, ou seja, k é constante:

$$k \left\{ \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} + \bar{q} \right\} = \rho C_p \frac{dT}{dt} \quad (3.18)$$

A difusividade térmica do meio, α , é dada por:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (3.19)$$

Assim, simplificando a expressão geral da Lei de Fourier, vem:

$$\nabla^2 T + \frac{\bar{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{dT}{dt} \quad (3.20)$$

Onde ∇^2 é o operador Laplaciano, expresso em coordenadas cartesianas como:

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2} \quad (3.21)$$

No caso em que não há calor a ser gerado no sistema a equação 3.17 pode ser reduzida à equação de difusão:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{dT}{dt} \quad (3.22)$$

No caso em que se está num regime estacionário e igualmente sem geração de calor, vem na forma:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (3.23)$$

A equação 3.23 é a equação de Laplace. Já nas equações 3.17 e 3.18, apresenta-se o regime transiente ou variável.

Condições iniciais e de contorno

Para a resolução da equação diferencial de Fourier e obter uma solução única devemos definir determinadas condições ao problema, são essas as condições iniciais e de contorno.

As condições iniciais especificam a temperatura dentro de um corpo num determinado instante $t = 0$, a partir da qual se conhecerá a distribuição de temperatura no sólido. A condição inicial mais simples de se referir é que a temperatura é uniforme e $T = t_0$.

Sendo que os sólidos estão limitados pela superfície de contorno, devemos saber o que acontece nesse contorno pois este pode estar sujeito a diferentes condições - condições de contorno. Tipicamente existem três tipos de condições de contorno:

1. A temperatura prescrita na superfície do contorno, que pode ser uma constante ou uma função das coordenadas e do tempo, é conhecida como condição de Dirichlet.
2. Uma taxa de fluxo de calor incidente na superfície de contorno, que pode ser uma constante ou uma função das coordenadas e do tempo, é conhecida como condição de Neuman.
3. Um fluxo de calor convectivo aplicado entre a superfície de contorno e o meio ambiente, é caracterizado por um coeficiente de convecção e é expresso pela Lei de convecção de Newton.

Para explicitar cada um dos tipos de condições anteriormente descritos é usado um exemplo simples presente em [31]. Se a superfície de contorno for constituída por uma face plana $x = L$, conforme Figura 3.3:

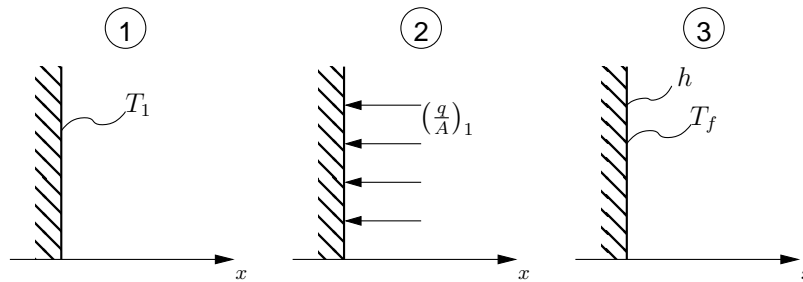


Figura 3.3: Exemplo para as diferentes condições de contorno.

Em $x = L$:

1. $T = T_1$
2. Se todo o fluxo $(\frac{q}{A})_1$, é aplicado na superfície, então por condução este fluxo passa da superfície para o sólido, entrando do seguinte modo para a equação de Fourier:

- $-k \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=L} = - \left(\frac{q}{A} \right)_1$

3. Pela Lei de convecção de Newton vem:

- $-k \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=L} = h (T_{x=L} - T_f)$
- Esta Lei será mais amplamente explicada na secção de convecção, em 3.2.2.

Assim, para formular convenientemente um problema de transferência de calor é necessário encontrar o tipo de equação diferencial de Fourier mais adequada, aplicar as devidas condições de fronteira e determinar condições iniciais se o problema for segundo um regime transiente, caso contrario, para um regime estacionário não existem condições iniciais.

3.2.2 Convecção

Segundo [31], "a transferência de energia de uma região para outra devido a um movimento macroscópico num fluido, adicionada à transferência de energia por condução é chamada de transferência de calor por convecção"

Este movimento macroscópico pode acontecer num líquido ou num gás e pode acontecer forçando o movimento ou por outro lado criando diferenças de temperatura que originam diferenças de densidade e consequentemente causa o movimento do fluido. Em resumo é possível distinguir dois tipos de convecção (Figura 3.4):

- Convecção forçada: movimento de um fluido causado por um agente externo (ex: ventilador eléctrico, vento)
- Convecção natural: movimento de um fluido ocorre devido a variações de densidade causada por diferenças de temperatura.

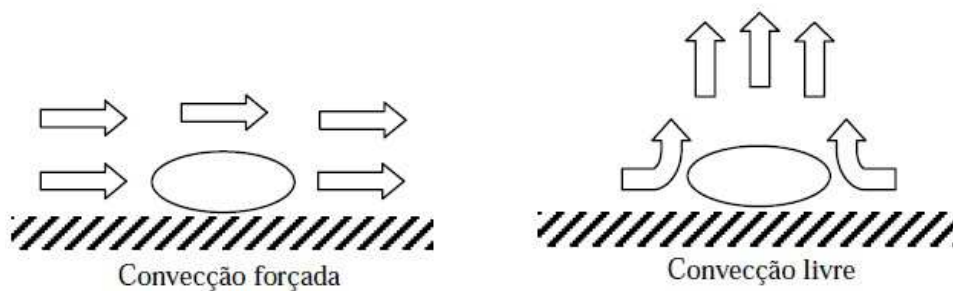


Figura 3.4: Exemplo de convecção forçada e livre - fonte [6].

No caso de uma superfície plana, como por exemplo uma camada de betão BCC, a convecção desenvolve-se do seguinte modo: à medida que o calor de hidratação é transmitido do betão para o ar em seu redor, este é aquecido e a sua densidade diminui, assim o ar eleva-se que acaba por arrefecer e consequentemente descer, de novo perto do calor de hidratação aquece e eleva-se, criando assim um ciclo que se manterá em funcionamento até ser atingido um equilíbrio térmico.

Lei de Convecção de Newton

Tendo uma superfície plana com uma determinada temperatura T_w , e um fluido (ex: água ou vento) em redor com uma temperatura T_f . Se $T_w > T_f$ a temperatura flui da superfície para o fluido, se $T_f > T_w$ acontece o inverso.

Esta Lei determina que o fluxo de calor por convecção da superfície para o fluido ou vice-versa é proporcional à diferença de temperatura entre os dois meios.

$$\frac{q}{A} \propto (T_w - T_f) \quad (3.24)$$

Apesar desta Lei também ser conhecida como a Lei de Newton de arrefecimento, é válida tanto para o aquecimento ou arrefecimento da superfície sólida [31].

Removendo o sinal de proporcionalidade à equação 3.24 vem:

$$\frac{q}{A} = h(T_w - T_f) \quad (3.25)$$

Em que:

- $\frac{q}{A}$ - é um fluxo de calor por área e vem em: $\frac{W}{m^2}$,
- h - é o coeficiente de convecção e vem em: $\frac{W}{m^2K}$,
- $T_w - T_f$ a diferença de temperatura vem em K ou $^{\circ}C$.

Nota: o valor de h é sempre positivo, apenas se faz a distinção quando o calor viaja da superfície para o fluido, vem $(T_w - T_f)$ (Figura 3.5), e quando viaja do fluido para a superfície vem $(T_f - T_w)$.

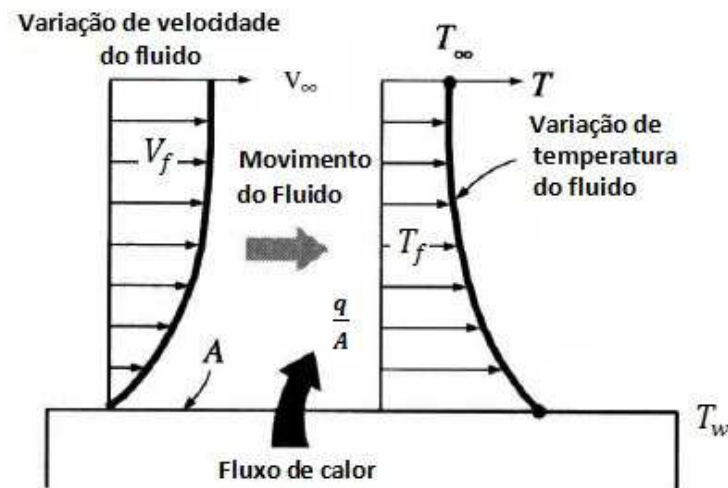


Figura 3.5: Fluxo térmico por convecção, caso de fluxo a viajar da superfície para o fluido $T_w > T_f$, em [6].

À semelhança dos valores de condutibilidade térmica, também é útil ter alguma sensibilidade nos valores do coeficiente de convecção h Tabela 3.2, disponível em [31]. Estes valores não são simples constantes pois podem variar de acordo com diferentes factores tais como, as propriedades do fluido (viscosidade, condutibilidade térmica, densidade, calor específico, etc.), a forma da superfície onde a convecção toma lugar, bem como a sua natureza (rugosa ou lisa) e a velocidade do fluido. Percebe-se assim que este valor é bastante complexo de ser obter.

3.2.3 Radiação

Segundo [31], "toda a matéria física emite radiação térmica sob a forma de ondas electromagnéticas devido a movimentos de rotação e vibração das moléculas e os itens que compõem a matéria."

Tabela 3.2: Valores aproximados do coeficiente de convecção

	Coeficiente de convecção ($W/m^2 K$)
Gases sem movimento (convecção natural)	5 até 25
Líquidos sem movimento (convecção natural)	50 até 300
Gases em movimento (convecção forçada)	15 até 250
Líquidos em movimento (convecção forçada)	100 até 5000
Líquidos em ebulição	2000 até 50000
Vapores condensados	2000 até 50000

Esta matéria pode estar em qualquer estado, seja sólido, líquido ou gás. A radiação segue duas características:

- A taxa de emissão de radiação aumenta, com o aumento de temperatura;
- Não é necessário nenhum meio material para que ocorra a transferência de energia, por serem ondas electromagnéticas, podem-se propagar tanto no vácuo, como sólido, líquido ou gás.

Este processo de transferência de energia é efectivamente o mais rápido, no vácuo a energia é transferida à velocidade da luz ($c = 3 \cdot 10^8 m/s$), segundo [6].

Designa-se por absorvidade α , reflectividade ρ e trasmissividade τ , as componentes da radiação térmica correspondendo às parcelas absorvida, reflectida e transmitida, respectivamente. O somatório de todas estas parcelas é igual à unidade.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (3.26)$$

Estando estas três grandezas sempre em função do comprimento de onda e da radiação incidente.

Lei de Stefan-Boltzman

Esta Lei determina que se tiver uma superfície que esta a uma temperatura absoluta T , então essa superfície vai emitir radiação térmica na forma de ondas electromagnéticas em todas as direcções - Figura 3.6.

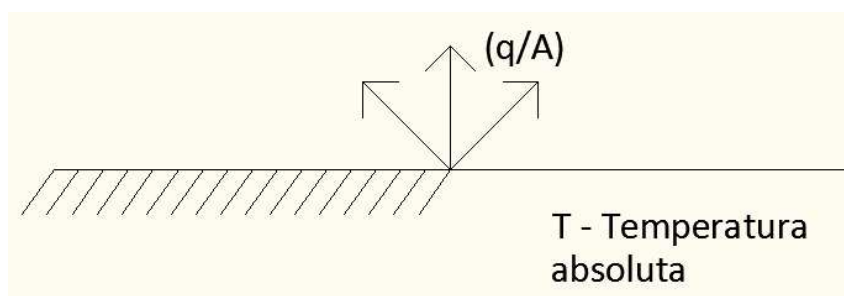


Figura 3.6: Superfície a uma temperatura T e que emite uma radiação (q/A) - [31].

A Lei diz que esse fluxo de calor será proporcional á temperatura absoluta da superfície elevado à quarta potencia T^4 , como explicito na equação 3.27.

$$\frac{q}{A} \propto T^4 \quad (3.27)$$

Removendo o sinal de proporcionalidade à equação 3.27 vem:

$$\frac{q}{A} = \sigma T^4 \quad (3.28)$$

Em que:

- $\frac{q}{A}$ é um fluxo de calor por área e vem em $\frac{W}{m^2}$,
- $\sigma = 5.669 \times 10^{-8}$ é a constante de Stefan-Boltzman vem $\frac{W}{m^2 K^4}$,
- T a temperatura absoluta vem em K .

Deve-se frisar que existem outras Leis de radiação como a Lei de Planck, Lei de Wien, Lei de Kirchoff [31] e a Teoria Clássica de Maxwell. Nesta ultima propõem-se que a radiação é emitida sob a forma de ondas electromagnéticas, enquanto que por Planck a transmissão é feita através de fotões discretos. De um modo geral um corpo está permanentemente a emitir radiações para o meio envolvente e absorve, reflecte ou transmite radiações provenientes de outros corpos [9].

Um irradiador ideal ou corpo negro, segundo [6], é definido como um emissor e absorsor perfeito, ou seja, para uma dada temperatura o corpo negro emite o máximo de radiação possível e absorve toda a energia radiante que sobre ele incide para qualquer comprimento de onda e direcção sem que haja reflexão. Este conceito é puramente teórico servindo apenas como padrão para comparação com outros corpos.

Assim, o fluxo de calor emitido por um corpo negro é dado pela equação 3.28, visto que os corpos reais não se comportam como irradiadores ideais, emitem uma radiação inferior à dos corpos negros. São por isso chamados de corpos cinzentos quando emitem, a uma temperatura igual à do corpo negro, uma parte da emissão do corpo negro. Para esses corpos o fluxo de calor transferido por radiação, à temperatura T_1 , para um corpo negro envolvente que esteja a temperatura T_2 é:

$$\frac{q}{A} = \sigma \epsilon (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.29)$$

Onde:

- ϵ é a emissividade da superfície cinzenta, varia entre 0 e 1, sendo 1 para o caso do corpo negro

O valor da emissividade depende da cor da superfície em questão, no caso do betão é proposto o valor de 0.88 para este coeficiente [9].

A equação 3.29 é valida quando o meio envolvente é vácuo ou é um gás (como o ar) que não interfere com a radiação, ou seja, os seus efeitos são desprezáveis [6].

A equação 3.29 pode ser linearizada e rescrita de uma forma mais simples:

$$\frac{q}{A} = h_r(T_1^4 - T_2^4) \quad (3.30)$$

$$h_r = \epsilon\sigma(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2) \quad (3.31)$$

Em que h_r é o coeficiente de transferência de calor por radiação. Desta forma é analisada a radiação com uma formulação idêntica à usada na convecção, sendo isto vantajoso pois podem-se assim fazer simplificações ao nível dos cálculos. Esta passagem da equação 3.29 a 3.30 e 3.31 só é válida se forem usadas temperaturas absolutas, ou seja em graus Kelvin.

Lei de Kirchoff da radiação

Quando um corpo está em equilíbrio com o meio envolvente tem-se que o fluxo de calor emitido será igual ao fluxo de calor absorvido, assim a emissividade será igual à absorvidade. Esta é a conclusão da Lei de Kirchoff da radiação que estabelece que:

$$\epsilon = \alpha \quad (3.32)$$

A equação 3.32 é válida para a mesma temperatura e para o mesmo comprimento de onda. Este resultado é interessante na determinação da taxa líquida de transferência de calor entre um corpo e o seu meio envolvente, o corpo com temperatura T e ambiente envolvente com temperatura T_1 .

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{emit} = \sigma\epsilon T^4 \quad (3.33)$$

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{asb} = \sigma\alpha T_1^4 \quad (3.34)$$

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{emit} - \left(\frac{q}{A}\right)_{asb} = \sigma\epsilon(T^4 - T_1^4) \quad (3.35)$$

Um exemplo prático do fluxo de calor absorvido, em 3.34, pode ser o calor da radiação solar directa ou difusa:

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{asb} = \alpha H_i \quad (3.36)$$

Em que:

- α é a absorvidade da superfície,
- H_i é a radiação solar directa, ou radiação incidente na superfície i .

Rescrevendo a equação 3.35 vem:

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{emit-abs} = \sigma\epsilon T^4 - \alpha H_i \quad (3.37)$$

Capítulo 4

Implementação em ANSYS

4.1 Generalidades sobre ANSYS

No desenvolvimento de todo este trabalho é usado o programa de elementos finitos ANSYS versão 11. Dada a sua facilidade de uso e fiabilidade tendo em conta as inúmeras possibilidades de utilização e recursos disponíveis para pré e pós-processamento.

Em geral há duas possibilidades de uso deste software, uma é o uso do interface clássico do programa por meio de acções interactivas (através do ANSYS *Interactive*), a outra é usando uma linguagem específica do ANSYS, o *Ansys Parametric Design Language* - APDL. Esta ultima permite acesso às mesmas funções que o interface clássico, mas além disso permite uma optimização e automatização dos modelos criados por meio de uma linguagem de programação. É criado e usado um ficheiro de input em linguagem APDL, onde há a vantagem de poderem ser definidos parâmetros, tabelas e até comandos que controlam a ordem em que outros comandos mais básicos são utilizados, como funções de looping (*do), ou funções de condição (*if).

Para este trabalho é usado o ANSYS *Interactive* em 4.2 por serem exemplos de resolução bastante simples, mas em 4.3 e todo o trabalho subsequente é usado o ANSYS APDL devido à maior potencialidade de funções, como por exemplo a técnica *Birth & Death*.

A funcionalidade *Birth & Death* do ANSYS é de grande importância e utilidade, aplicando-se a problemas que sejam caracterizados por uma construção sequencial no tempo, como é o caso da aplicação sequencial de camadas numa barragem de BCC. Esta ferramenta permite que os elementos de uma malha sejam "activados" (birth) ou "desactivados" (death) conforme seja necessário, usando os comandos definidos. Com o uso destes comandos, quando os elementos são "desactivados" não são removidos da malha, permanecendo graficamente. Ao desactivar um elemento esta a multiplicar-se o seu respectivo valor da matriz de condutividade por um severo valor de redução, bem como a anulação de todas condições de contorno referentes ao mesmo elemento. Logo, usando esta técnica, uma análise de um processo construtivo ao longo do tempo pode ser feita com apenas uma malha de elementos em vez de várias malhas, correspondentes a cada estágio de construção a analisar, revelando-se de grande vantagem o seu uso.

Quanto ao tipo de elementos a utilizar em ANSYS foi definido o PLANE 55, frequentemente usado em problemas térmicos em 2-D, pois possui capacidade térmica de condução. Tem quatro nós, e cada um deles apenas um grau de liberdade, a temperatura, como mostra a Figura 4.1. Tem a capacidade de poder ser utilizado tanto em problemas de regime estacionário, como transiente e ainda tem a característica de suportar problemas com a técnica *Birth & Death* [2].

Para os elementos estruturais é utilizado o PLANE 182 que usa como opção de simplificação 2-D a deformação plana, pois é o assumido para casos de sólidos com uma espessura grossa, como barragens. Este elemento à semelhança do PLANE 55 também possui quatro nós, como na Figura 4.1, mas cada nó tem dois graus de liberdade, translação na direcção x e y. O elemento possui plasticidade, hiperelasticidade, grande deflexão e capacidade de sofrer grandes tensões [2].

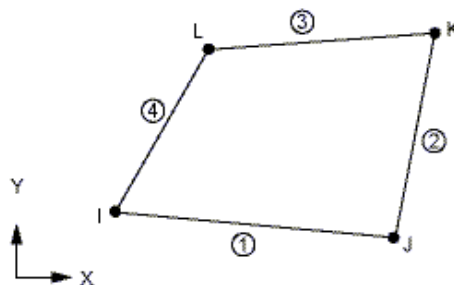


Figura 4.1: Geometria do elemento 2-D térmico - PLANE 55 e estrutural - PLANE 182 [2].

Deve-se referir que a máquina computacional utilizada para resolver todas as análises do presente capítulo tem as seguintes características:

- Intel Core 2 CPU T5500 1.66 GHz
- 2.00 GB de memória RAM instalada

4.2 Exemplos Simples Comparativos FLAC versus ANSYS

Nesta secção são resolvidos pequenos exemplos de problemas térmicos em dois softwares distintos, o ANSYS e o FLAC. Os resultados das duas soluções são comparadas entre si e com a respectiva solução analítica. São usados exemplos dos dois processos de transferência de calor existentes, o regime estacionário e o transiente.

4.2.1 Exemplo - Regime estacionário

Para descrever o regime estacionário é usado um exemplo presente em [13], onde uma placa rectangular troca calor com uma parede de temperatura constante, como exposto na Figura 4.2. As propriedades térmicas aplicadas são a condutividade de $15 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ e coeficiente de convecção de $15 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. O sólido rectangular é considerado

isotrópico, homogêneo e contínuo, e as suas propriedades térmicas são consideradas independentes da temperatura.

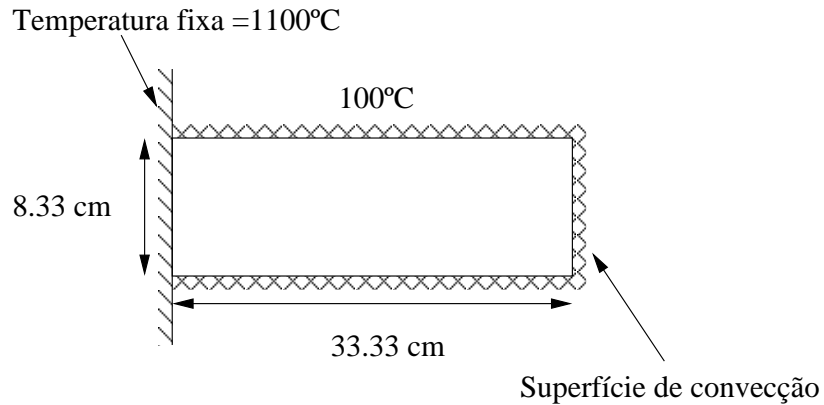


Figura 4.2: Exemplo Flac - Placa rectangular.

Este sólido sob estas condições é levado ao estado térmico estacionário pelo FLAC e o ANSYS, onde um equilíbrio térmico é obtido e a distribuição de temperatura se torna constante. São então comparadas as diferentes soluções na Figura 4.3.

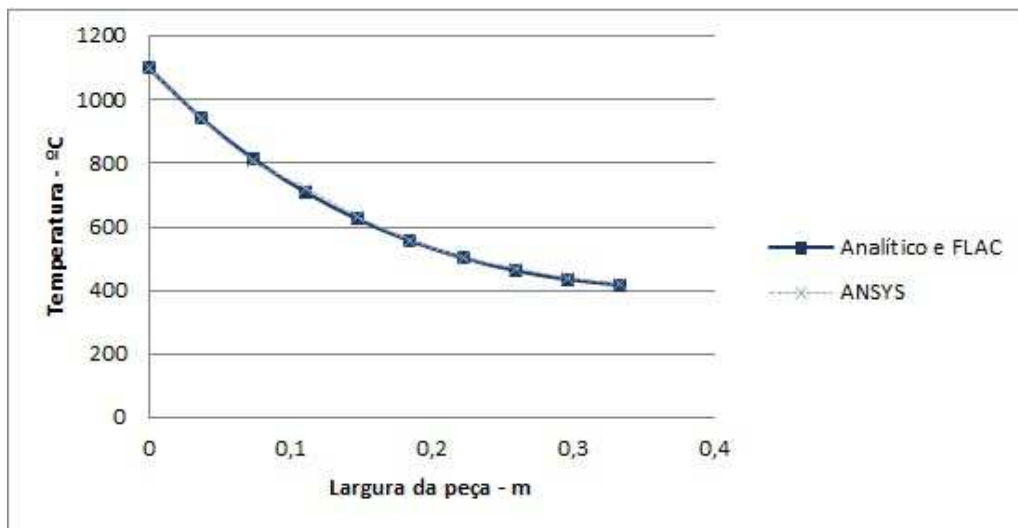


Figura 4.3: Distribuição de temperatura ao longo da peça em regime estacionário.

Segundo a análise da Figura 4.3, é concluído com facilidade que as soluções obtidas pelas duas ferramentas numéricas são muito próximas entre elas e também com a solução analítica. Com erros entre valores inferiores a 1%, aceitam-se como válidas as soluções.

4.2.2 Exemplo - Regime transiente

Para representar o regime transiente foi novamente usado um exemplo presente em [13]. É um exemplo em 1D de uma peça que gera calor interno, ou seja, produz 40 kW/m^3 de forma constante ao longo do tempo, sujeita a uma temperatura inicial de 60°C e como condições de contorno uma temperatura fixa de 32°C nas extremidades (Figura 4.4). As suas propriedades físicas do material estão presentes na tabela 4.1.

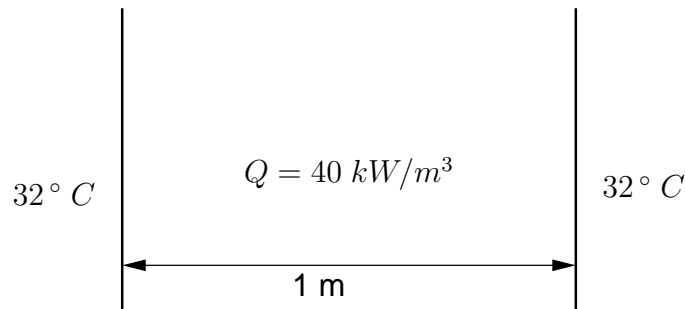


Figura 4.4: Exemplo Flac - Placa geradora de calor.

Tabela 4.1: Propriedades do Material

Densidade	Calor Específico	Condutividade Térmica
500 kg/m^3	$0.2 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$	$20 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Neste exemplo a temperatura varia ao longo da peça e ao longo do tempo também, pois está a ser gerado um calor interno que apesar de ser constante faz com que a temperatura no centro da peça evolua até atingir um valor constante, como presente na Figura 4.5.

Assim, segundo a Figura 4.5, a temperatura do centro da peça é considerada constante a partir dos 5 segundos após o início da geração de calor. Também é neste momento que este problema deixa de ser considerado de regime transiente e entra numa fase estacionária. Para a comparação de soluções só vai ser analisado o período de regime transiente, em particular para $t=0,5\text{s}$ e $t=5\text{s}$ como demonstra a Figura 4.6. Como forma de simplificação está presente só um dos lados da peça, visto que esta é simétrica. Deve-se referir que para a resolução deste exemplo o refinamento de malha adoptado foi de 0.05 m e o passo de tempo usado foi de 1 s , contudo para um melhor refinamento do tempo adopta-se um sub-passo de 50.

Com a análise dos resultados na Figura 4.6 várias conclusões podem ser retidas:

- Os valores calculados analiticamente são muito idênticos aos obtidos em FLAC, com erros nulos para $t=5\text{s}$ ou inferiores a 1% para $t=0.5\text{s}$.
- Os valores obtidos em ANSYS são também bastante aceitáveis, contudo, desviam-se um pouco dos valores analíticos quanto mais perto da extremidade da peça estão. Isto é observado graficamente na Figura 4.6, bem como na análise de erro que chega a ser 10% para $t=5\text{s}$ junto à extremidade.

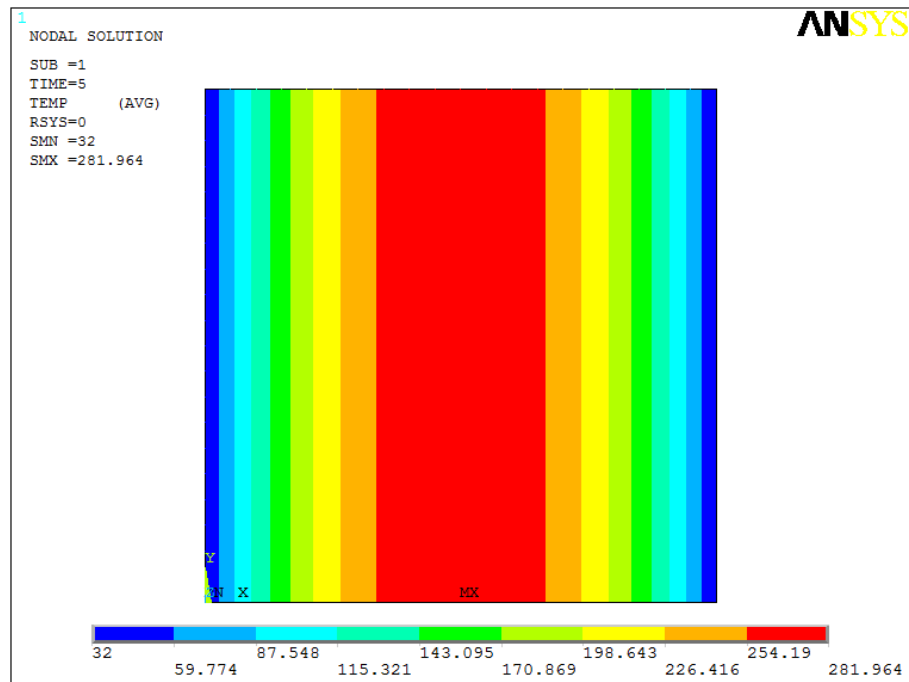


Figura 4.5: Distribuição de temperatura para o Exemplo de Regime transiente para $t=5s$.

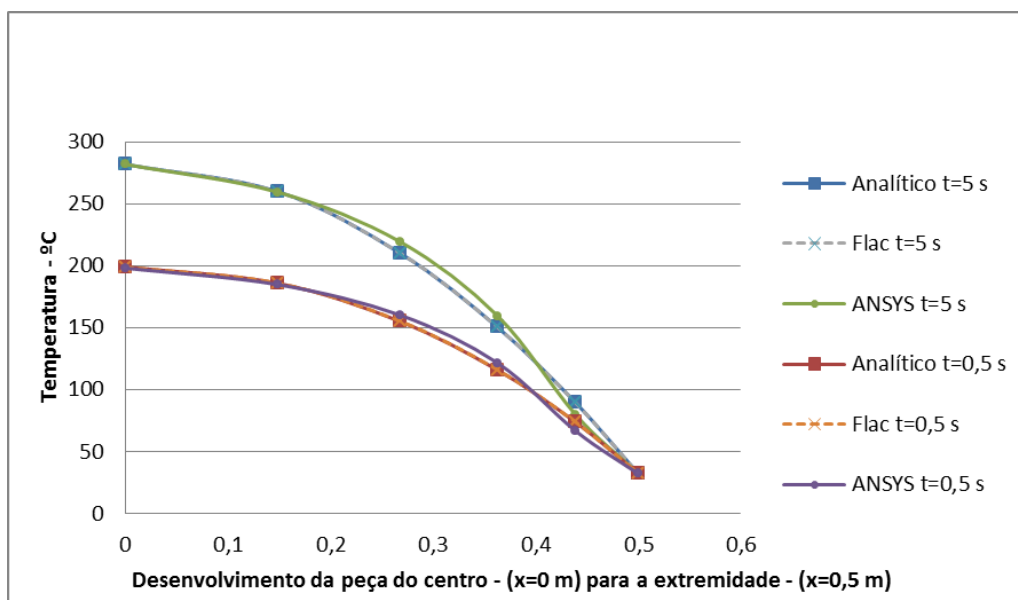


Figura 4.6: Distribuição da temperatura para diferentes tempos e soluções.

Visto que os valores obtidos por ANSYS em certos pontos da peça apresentaram erro ligeiramente alto decidiu-se fazer um aumento do refinamento da malha em 5 vezes passando de 0,05m para 0,01m. Foi claro que o tempo de processamento foi superior, mas os valores tornaram-se bastante melhores, com erros muito inferiores a 1%. Fica claro que a capacidade de refinamento da malha dada pelo ANSYS é uma grande mais valia na obtenção de resultados mais fiáveis.

4.3 Exemplo do processo construtivo de um BCC

4.3.1 Apresentação do problema base

Tendo por base um estudo térmico de uma barragem BCC [29], foi recriado o mesmo trabalho com o programa ANSYS. Este trabalho foi desenvolvido originalmente no LNEC e com recurso ao programa de diferenças finitas FLAC.

No trabalho [29] é simulada a construção de uma barragem BCC em 20 camadas, com uma altura de 0,3 m cada camada e cada uma destas adicionada num intervalo de tempo de 8 ou 16 horas. Além dos dois tempos de colocação diferentes é também analisada a simulação para dois períodos anuais diferentes, Verão e Inverno, onde varia a temperatura de colocação do betão/temperatura do ambiente em temperaturas uniformes de 25°C no Verão e 10°C no Inverno. É um modelo bidimensional que retrace uma secção transversal (montante - jusante) de uma barragem BCC, tendo uma largura de 5 m e uma profundidade de 1 m.

O material é considerado homogéneo e isotrópico com as propriedades apresentadas na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Propriedades do Material

Condutibilidade Térmica	Calor Específico	Densidade	Dosagem de Cimento
2.1 W/m°C	833.3 Jkg ⁻³ K ⁻¹	2400 kg/m ³	240 kg/m ³

Como quantidade de calor (Q) associada ao desenvolvimento do calor de hidratação do cimento é dada a equação 4.1, em função do tempo (t) em horas e da temperatura (T) em graus centígrados. A quantidade de calor é presente em cal/g.

$$Q(t, T) = 95[1 - (t + 1)^{-(0.123 + 0.0035T)}] \quad (4.1)$$

Sendo este um ponto de grande mais-valia na escolha deste trabalho para o estudo comparativo pois, como mencionado anteriormente, esta equação é de difícil obtenção por via experimental e poucas vezes se encontra disponível na literatura ou em trabalhos experimentais. E neste trabalho esta curva é a característica para este betão.

É a partir da equação 4.1 que se determina a curva de hidratação do cimento, sendo esta equação definida como o calor acumulado e gerado devido à hidratação até ao tempo t [15]. Na Figura 4.7 mostra-se a apresentação gráfica curva de hidratação do cimento, em J/g (a conversão de unidades esta descrita no Apêndice A).

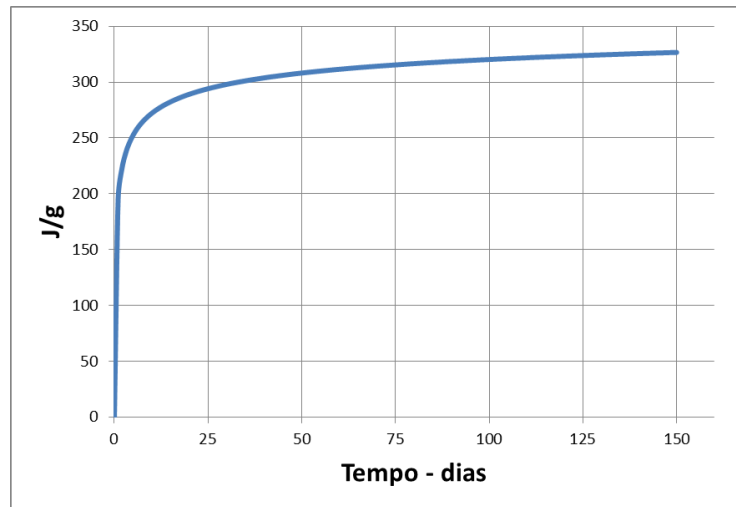


Figura 4.7: Curva de hidratação do cimento ao longo do tempo.

Deve-se fazer a transformação da equação 4.1 de quantidade de calor na taxa de geração de calor, \bar{q} , para poder ser utilizada na equação 3.17.

Ou seja,

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \bar{q} = - \frac{26527.7778 \left(\frac{1}{3600}t + 1 \right)^{(-0.123 - 0.0035T)} (-0.123 - 0.0035T)}{\frac{1}{3600}t + 1} \quad (4.2)$$

Todos os cálculos intermédios para se obter a taxa de geração de calor estão descritos no Apêndice A e o gráfico desta curva apresenta-se na Figura 4.8, em J/m^3h por ser mais fácil a sua visualização.

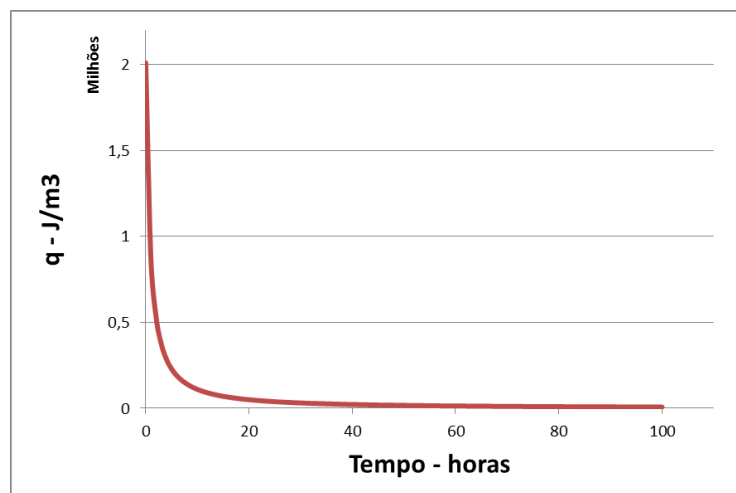


Figura 4.8: Curva de geração de calor ao longo do tempo.

Este problema base é considerado de regime transiente, por haver uma evolução da

temperatura ao longo do tempo presente na equação de calor 4.1 que também é função do tempo.

Deve-se referir que no trabalho desenvolvido em FLAC toda a construção da barragem está calculada e apresentada com um plano de simetria, um plano vertical paralelo ao eixo da barragem, na qual é imposto a condição de fluxo nulo. Foi utilizado este esquema por razões computacionais, pois diminuiu o volume de resultados bem como o tempo de processamento.

4.3.2 Metodologia e Sequência da Análise Térmica em ANSYS

Para a recriação deste modelo numérico em ANSYS é utilizada a técnica *Birth & Death* por ser muito eficaz e adequada a este tipo de problemas de colocação de camadas ao longo do tempo, pois usando apenas uma malha de elementos finitos para toda a estrutura, consegue automaticamente fazer a colocação de camadas conforme definido pelas condições do problema. Na Figura 4.9 mostra-se uma sequência das potencialidades do uso da técnica *Birth & Death*.

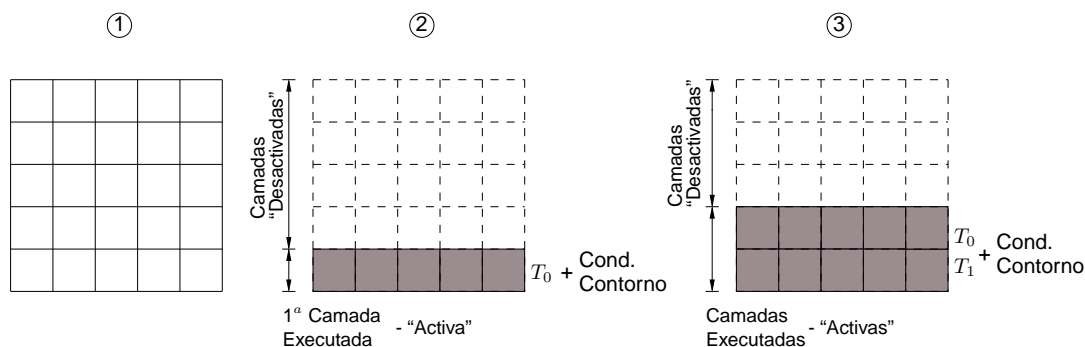


Figura 4.9: Sequência de análise: 1- Estrutura discretizada; 2- Execução da primeira camada; 3- Execução das camadas sucessivas.

De forma bastante diferente desta última, mas igualmente válida, a técnica utilizada no trabalho [29] era mais trabalhosa quanto ao modo de processar a colocação de uma nova camada, exigindo que se simulasse a colocação de novas camadas com recurso a uma programação em Excel totalmente paralela e independente do FLAC, além de ser necessário diferentes malhas de elementos finitos ao longo do processo, tornando deste modo a resolução bastante trabalhosa e demorada.

Dado ser a recriação de um modelo numérico em ANSYS, aproveitou-se para fazer alguns acrescentos em termos de funcionalidades relativamente ao feito originalmente em FLAC. Isto é possível pois é usado neste novo código a linguagem de programação do ANSYS *APDL*. Estes acréscimos não influenciam em nada os resultados, apenas permitem expandir as funcionalidades e capacidades do trabalho [29]. Tendo sido construída uma base para trabalhos e estudos futuros nesta área, já que além de poder reproduzir todo o trabalho de [29] com os dados deste, mencionados em 4.3.1, também

pode realizar um estudo da evolução da distribuição de temperaturas numa barragem BCC para qualquer um dos seguintes parâmetros:

- l - comprimento das camadas (apenas metade do valor real do comprimento da camada, dado o uso de eixo de simetria);
- n - numero de camadas a executar/numero de áreas;
- h - altura de cada camada;
- T - temperatura de colocação do betão/temperatura ambiente;
- p - intervalo de tempo entre cada camada;
- pm - refinamento da hora (para obtenção de resultados mais precisos)
- rm - refinamento da malha (para obtenção de resultados mais precisos)
- Propriedades térmicas e estruturais do material (condutibilidade térmica, calor específico, densidade, modulo de elasticidade, coeficiente de poisson e coeficiente de dilatação térmica)

Este conjunto de parâmetros esta disponível no ficheiro de input do ANSYS criado e pode ser alterado conforme as necessidades e objectivos do utilizador.

Em seguida vem uma explicação mais pormenorizada dos passos da sequência de análise térmica e na Figura 4.10 mostra-se um fluxograma da mesma rotina.

1. Definição do tipo de elementos térmicos - PLANE 55;
2. Definir e gerar a malha de elementos finitos:
 - Definir dimensões de cada camada - l e h ;
 - Definir numero de camadas - n ;
 - Definição do refinamento da malha - rm ;
3. Definição das propriedades dos materiais:
 - Condutibilidade Térmica;
 - Calor Específico;
 - Densidade;
4. Definição de dados referentes à análise:
 - Temperatura de colocação do betão/Temperatura ambiente - T ;
 - Intervalo de tempo entre cada camada - p ;
 - Elevação adiabática do material - curva de geração do calor;
5. Seleccionar e desactivar todos os elementos da malha, excepto os da 1ª camada, com recurso ao comando *ekill*;

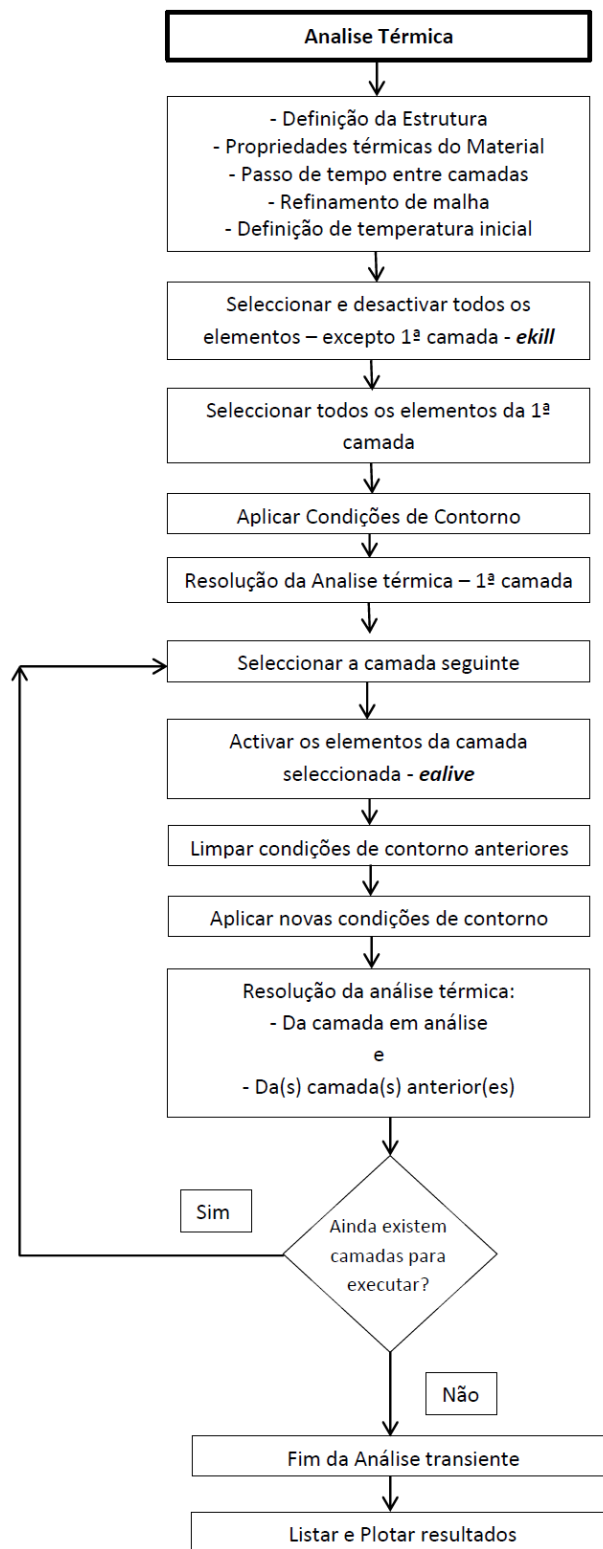


Figura 4.10: Fluxograma da sequência da análise térmica em Ansys.

6. Seleccionar todos os elementos da malha da 1ª camada e aplicar as condições de contorno definidas anteriormente, ou seja, aplicar as temperaturas às superfícies da 1ª camada;
7. Resolver a análise térmica para a 1ª camada para o passo de carga inicial;
8. Seleccionar a camada seguinte e activar os seus elementos com recurso ao comando *ealive*;
9. Limpar as condições de contorno que já não fazem sentido na camada anterior, ou seja, as temperaturas na superfície de cima da camada anterior, pois nesta superfície virá uma nova camada;
10. Aplicar as novas condições de contorno a esta camada, ou seja, aplicar as temperaturas nas superfícies que se adequam a esta nova camada;
11. Resolução da análise térmica para a camada em análise para o passo de carga inicial;
12. Resolução da análise térmica para a(s) camada(s) anterior(es) para o passo de carga de sequência do tempo;
13. Repetir os passos 8 a 12 até que resolvidas todas as camadas definidas em n ;
14. Listar e plotar resultados.

4.3.3 Apresentação do Modelo

Aqui são apresentados os modelos obtidos, usando a sequência descrita anteriormente. Serão apresentados os modelos numéricos apenas para 3 camadas para já, em contra ponto às 20 camadas analisadas pelo modelo inicial, por uma questão de simplicidade de explicação. Em relação ao modelo inicial também só irá ser recriado o modelo para as condições de verão ($T=25^{\circ}\text{C}$) e para o intervalo de colocação de camadas de 16h (p).

No modelo numérico criado em ANSYS existem duas formas de aperfeiçoar o problema podendo conduzir assim a soluções mais próximas da exacta. Ambas as formas podem ser introduzidas no input do modelo, ou seja, podem ser definidas logo a partida antes de este começar a ser "lido" pelo ANSYS. São definidas como:

1. O refinamento da malha de elementos finitos, usado em qualquer programa de MEF. (Ícone de Input - rm)
2. Visto que a equação de taxa de geração de calor 4.2 está em segundos, pois o ANSYS só recebe estas unidades, o passo de tempo seria de 1 segundo. Sendo este passo de tempo impossível de se aplicar pelo tempo de cálculo que dispenderia, foi criado um artifício à equação 4.2 para que o passo de tempo fosse de 3600 segundos. Ora, como este passo também é demasiado largo por não obter resultados precisos, foi criada também uma forma de refinar esta hora (ou 3600 s) e assim é possível "dividir" a hora num número de partes (pm), para assim utilizar o modelo da forma que melhor convier ao utilizador. (Ícone de input - pm)

Estas duas funcionalidades de input são extremamente relevantes, pois são estas duas que permitem fazer o refinamento. Sendo que, quanto menor o valor de rm e maior o valor de pm , maior morosidade trazem no processamento, mas melhores resultados podem auferir.

Para a apresentação do modelo foram definidos 3 parâmetros iniciais, presentes na tabela 4.3, cada uma apresenta 3 tipos de refinamento de malha e para todas é definido o mesmo valor de $pm=20$. Num estudo posterior, em 4.3.4 é feita uma comparação para diferentes valores de pm e discutidas as diferenças entre os seus resultados.

Tabela 4.3: Parâmetros iniciais 1, 2 e 3.

1	2	3
$rm=0.15$	$rm=0.05$	$rm=0.01$

Resolve-se o modelo em ANSYS para 3 camadas e com condições de geometria e propriedades dos materiais seguintes:

- $l = 2.5m$;
- $n = 3$;
- $h = 0.3m$;
- $T = 25^{\circ}C$;
- $p = 16h$;
- pm e rm presentes na tabela 4.3;
- Equação de calor - Equação 4.2.

Na Figura 4.11 apresenta-se o modelo com o refinamento de malha do parâmetro nº1 explícito na tabela 4.3, com a indicação das diferentes camadas que equivalem às diferentes áreas.

Quanto ao número de elementos e nós vai depender sempre de cada refinamento de malha. Assim:

- Para o parâmetro nº1 - $rm=0.15$ - Figura 4.11
 - Elementos - 102
 - Nós - 126
- Para o parâmetros nº2 - $rm=0.05$
 - Elementos - 900
 - Nós - 969
- Para o parâmetros nº3 - $rm=0.01$

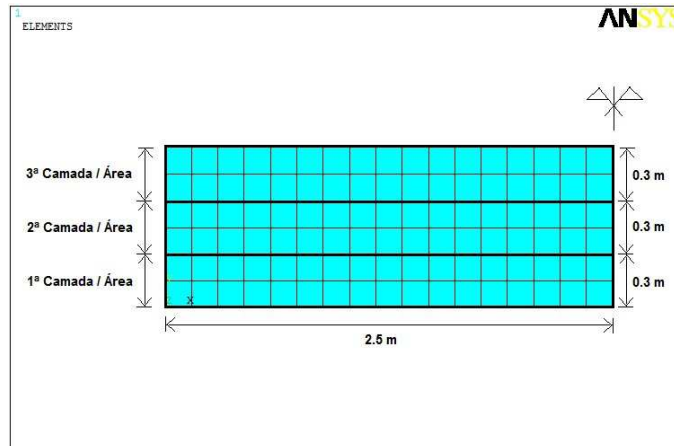


Figura 4.11: Modelo com 3 camadas e refinamento de malha $rm=0.15$.

- Elementos - 22500
- Nós - 22841

Será apresentada agora a distribuição de temperaturas para a análise transiente ao longo de 48 horas, em particular para os parâmetros iniciais nº2 apresentados na tabela 4.3.

Em cada uma das extremidades das camadas está aplicada a temperatura de 25°C como condições de contorno. E em seguida é processada a sequência criada em Ansys, presente na Figura 4.10, para as condições particulares definidas.

São apresentadas nas Figuras 4.12 a 4.14 a sequência de colocação de camadas, com a sua respectiva distribuição de temperaturas através de linhas isotérmicas.

É possível perceber a sequência de construção por camadas, a 1ª camada é activada no início do processamento enquanto a 2ª e 3ª se mantêm com os seus elementos e nós inactivos, ou seja, os seus graus de liberdade anulados durante o uso do comando *ekill*. Assim que se deve sobrepor a 2ª camada às 16h, os elementos e nós correspondentes a esta camada são automaticamente activos ao usar o comando *ealive*. Durante este momento, a 1ª camada continua a análise transiente inicial, a 2ª camada inicia uma análise transiente e a 3ª camada ainda se mantém com os nós e elementos inactivos até às 32h. Neste momento repete-se o processo para a 3ª camada, anteriormente descrito para a 2ª camada, até ao fim da análise transiente, às 48h.

Analisando-se os resultados obtidos, percebe-se que a temperatura vai aumentando de forma gradual, à medida que se vão colocando as camadas. A temperatura máxima registada é de 34.43°C e ocorre muito perto do núcleo da estrutura. Esse valor regista-se para $t=36h$.

Ao longo do tempo assinala-se também a gradual dissipação de temperatura junto às extremidades superior, inferior e laterais, onde a temperatura vai tendendo para os 25°C, pois é a temperatura fixa do meio envolvente.

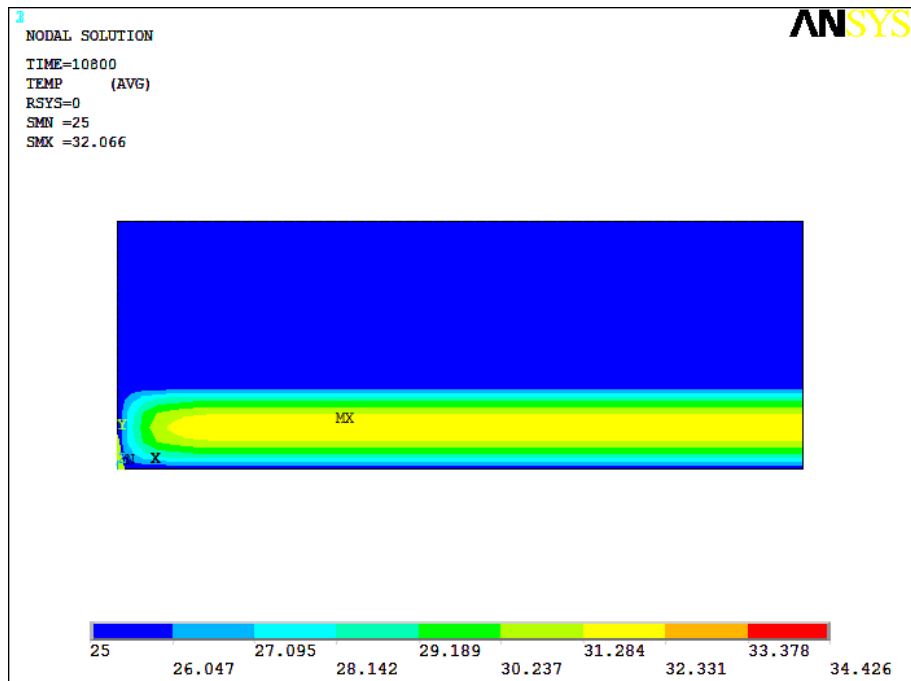


Figura 4.12: Distribuição de temperaturas 3h após ter sido iniciada a colocação da 1ª camada.

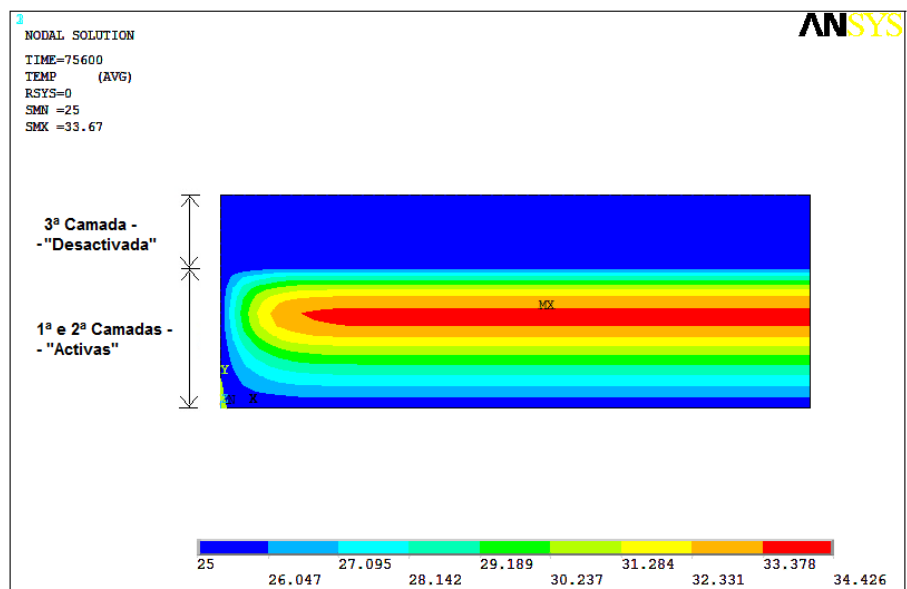


Figura 4.13: Distribuição de temperaturas 5h após ter sido iniciada a colocação da 2ª camada.

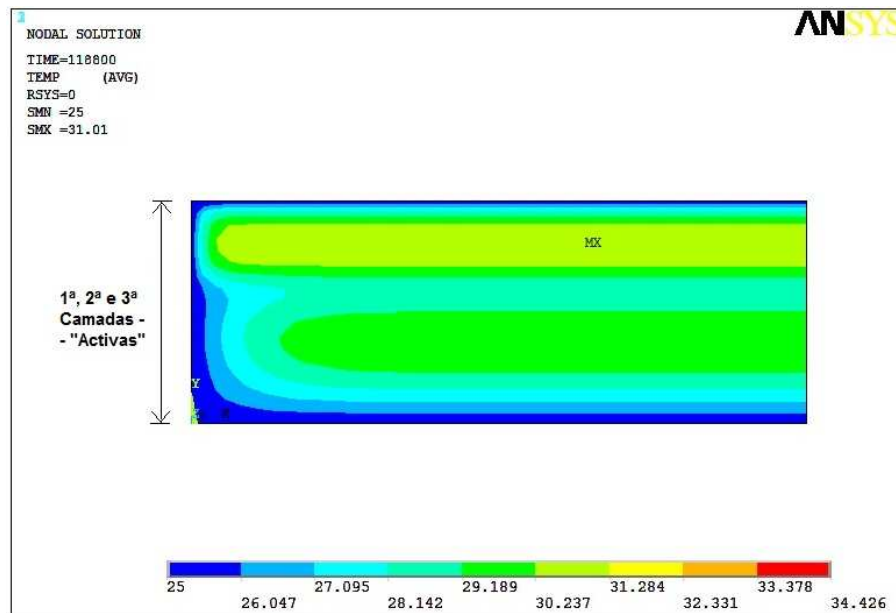


Figura 4.14: Distribuição de temperaturas 1h após ter sido iniciada a colocação da 3ª camada.

No trabalho [29], foram definidas duas secções para apresentação de resultados, ambas apresentadas na Figura 4.15. A secção I está localizada na zona do betão junto à superfície, enquanto a secção II localiza-se praticamente junto ao núcleo da estrutura. Tendo sido apurado pelo mesmo trabalho que junto ao núcleo as temperaturas acumulavam-se devido aos efeitos da elevação adiabática do betão, e pelo contrario, junto à superfície da estrutura as temperaturas seriam muito menores devido ao fácil escape da temperatura para o exterior.

Na Figura 4.16 está presente a evolução de temperatura obtida pela rotina de ANSYS das 3 camadas na secção II, ou seja, a 1ª, 2ª e 3ª camadas correspondem ao ponto A, B e C, respectivamente da Figura 4.15.

Através da análise Figura 4.16 é bastante clara a influencia que a colocação de novas camadas tem na temperatura. É visível que quando se coloca uma camada existe um aumento de temperatura e este influí directamente na temperatura da camada precedente, fazendo com que haja um aumento de temperatura também nessa camada. É também significativo que aos 144000 segundos ou 40 horas, a temperatura da 3ª camada já está num ritmo decrescente e no mesmo instante a temperatura da 2ª camada esteja num ritmo crescente. Este fenómeno é explicado pelo facto da 2ª camada ser mais interna e que por um lado tem maior dificuldade em libertar a sua temperatura pois está longe da extremidade, por outro lado a temperatura desta camada está a ser directamente influenciada pela 3ª camada, como explicito anteriormente.

Em seguida é feita uma comparação rápida dos valores obtidos em ANSYS e apresentados na Figura 4.16, com os obtidos em FLAC no trabalho [29], presente na Figura 4.17.

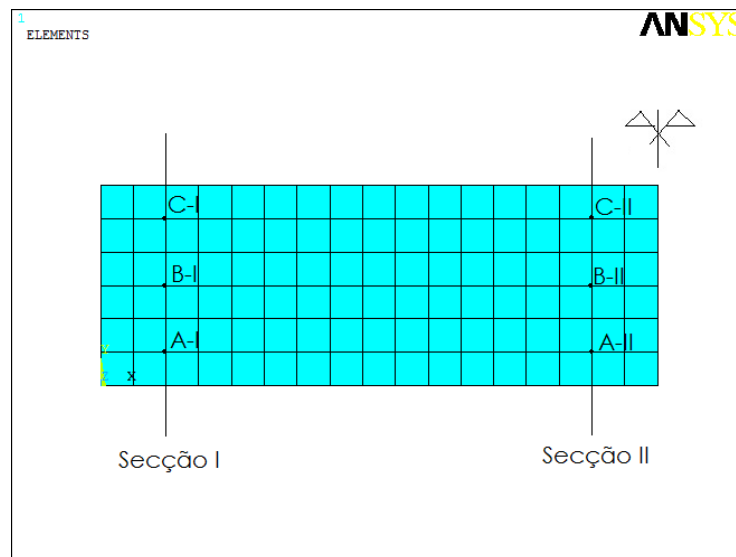


Figura 4.15: Malha de elementos finitos para 3 camadas e $rm=0.15$, com os pontos da secção I e II definidos.

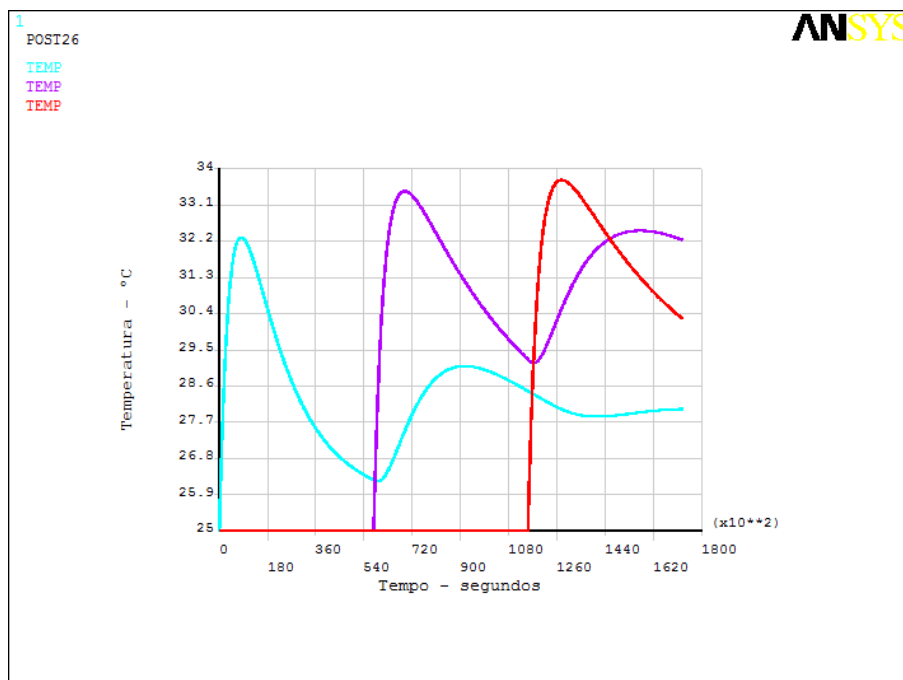


Figura 4.16: Evolução da temperatura das 3 camadas na secção II - 1ª camada em azul, 2ª camada a roxo e 3ª camada a vermelho.

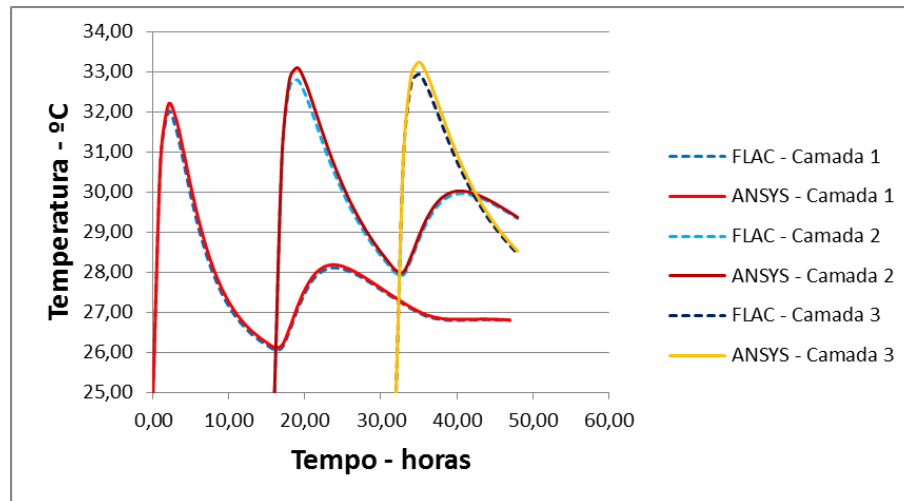


Figura 4.17: Sequencia de colocação de 3 camadas ao longo do tempo - FLAC vs Ansys - secção II - Dados do FLAC obtidos de [29].

Pela observação da Figura 4.17 é fácil reparar que tanto os valores calculados no modelo em ANSYS como em FLAC são bastante idênticos com erros relativos entre 0% e 2%. Mesmo sabendo que constituí desde já uma boa aproximação, será feito um estudo mais alargado em 4.3.4 para perceber os comportamentos do modelo com outros refinamentos e adoptar um como o mais adequado para a realização de uma sequência com um número maior de camadas.

4.3.4 Estudo de Refinamento

Para verificar tanto a validade do modelo criado em Ansys como a proximidade de resultados entre os modelos e eventualmente a aproximação à solução exacta, continua-se o estudo para a sobreposição de apenas 3 camadas. É assim estudada com maior detalhe a aproximação entre os resultados obtidos com o modelo de ANSYS e do trabalho [29].

Continua-se apenas com as 3 camadas, ao contrário das 20 camadas analisadas pelo modelo inicial, por uma questão de rapidez deste estudo, dada a morosidade e quantidade de resultados que são originados com as características iguais ao modelo inicial. No seguimento deste estudo será feito então um outro mais alargado, mas também mais geral para o modelo com 20 camadas.

Nesta análise serão mais amplamente estudadas as duas funcionalidades de input *rm* e *pm*, pois são estas duas que permitem fazer um melhor refinamento. Mas, como já explicito em 4.3.3, ao fazer maiores refinamentos, podem-se obter melhores resultados, mas também originam um processo computacional mais lento.

Deve-se encontrar então a forma de obter resultados mais perto da solução exacta com o esforço computacional mais adequado. Por esforço computacional adequado entenda-se aquele que se tem à disposição num computador portátil particular, sem

levar muito tempo de processamento e sem usar muita memória computacional para a sua resolução.

Assim, são definidos três conjuntos de parâmetros iniciais (tabela 4.4) para serem testadas e comparadas entre elas e ver qual a mais adequada para futuros testes. (São definidas 3 parâmetros de refinamento da malha para perceber o que acontece em cada uma delas, bem como para cada refinamento de malha são feitos dois refinamentos de hora.)

Tabela 4.4: Conjuntos de parâmetros iniciais 1, 2 e 3.

1		2		3	
rm=0.15	pm=20 pm=80	rm=0.05	pm=20 pm=80	rm=0.01	pm=20 pm=80

Estudando assim o modelo em Ansys para 3 camadas e com condições de geometria e propriedades dos materiais seguintes:

- $l = 2.5\text{m}$;
- $n = 3$;
- $h = 0.3\text{m}$;
- $T = 25^\circ\text{C}$;
- $p = 16\text{h}$;
- pm e rm presentes em cada coluna da tabela 4.4

Para proceder à análise de resultados são elaborados uns gráficos de aproximação de temperaturas, onde vem $T_{rel} = T_F/T_A$ no eixo das ordenadas e o tempo (t) em abcissas. T_F são os valores de temperatura dados pelo FLAC (em [29]) e T_A os valores de temperatura obtidos pelo ANSYS. Assim, os valores das temperaturas dadas por FLAC e ANSYS, são tanto mais próximas quanto mais perto o T_{rel} estiver do valor 1. É feita uma análise de acordo com as secções definidas na Figura 4.15.

- Análise dos gráficos de aproximação por cada camada para a secção I

Na Figura 4.18 vem o gráfico de aproximação para a camada 1 com os parâmetros iniciais 1, 2 e 3, apresentadas na tabela 4.4.

Na observação da Figura 4.18, é fácil perceber que no geral existe uma boa aproximação entre os valores obtidos em FLAC e os obtidos em Ansys, sendo que onde existem maiores distanciamentos entre os valores é no momento em que são colocadas as camadas, ou seja, num intervalo de poucas horas depois das zero horas e depois das 16 horas. Depois destes momentos existe uma tendência para os valores se aproximarem. Observa-se facilmente que para os parâmetros iniciais 1, os valores de temperatura são os menos precisos, pois os valores de T_{rel} chegam perto de 1,02. Em contraponto com

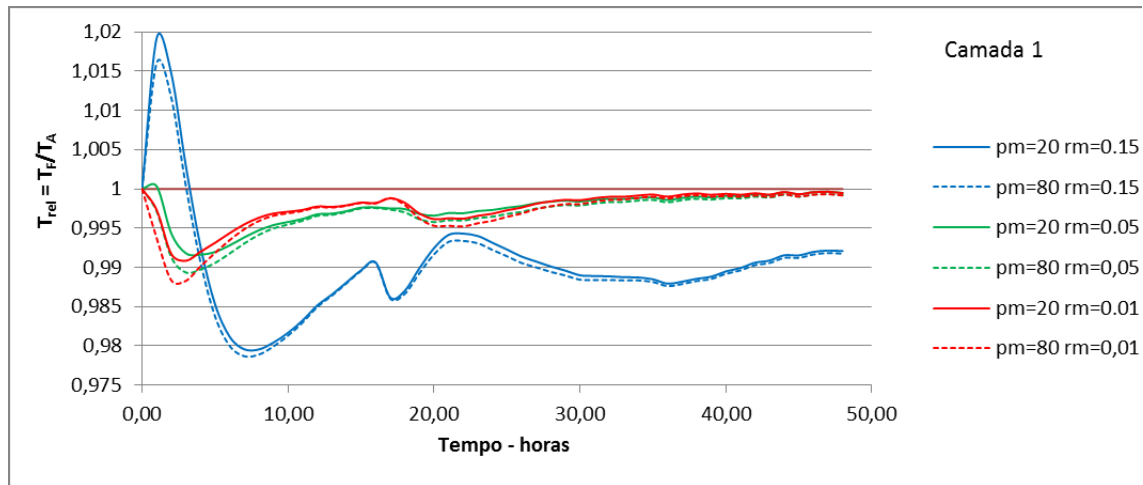


Figura 4.18: Gráfico de aproximação para a primeira camada com as diferentes parâmetros iniciais.

os parâmetros iniciais 2 e 3, ou seja, maior refinamento de malha, os valores máximos de T_{rel} , baixam para cerca de metade.

Na Figura 4.19, é também apresentado um gráfico de aproximação para a camada 1, mas apenas com o conjunto dos parâmetros iniciais 2 e 3 para um maior detalhe gráfico das mesmas em relação à Figura 4.18.

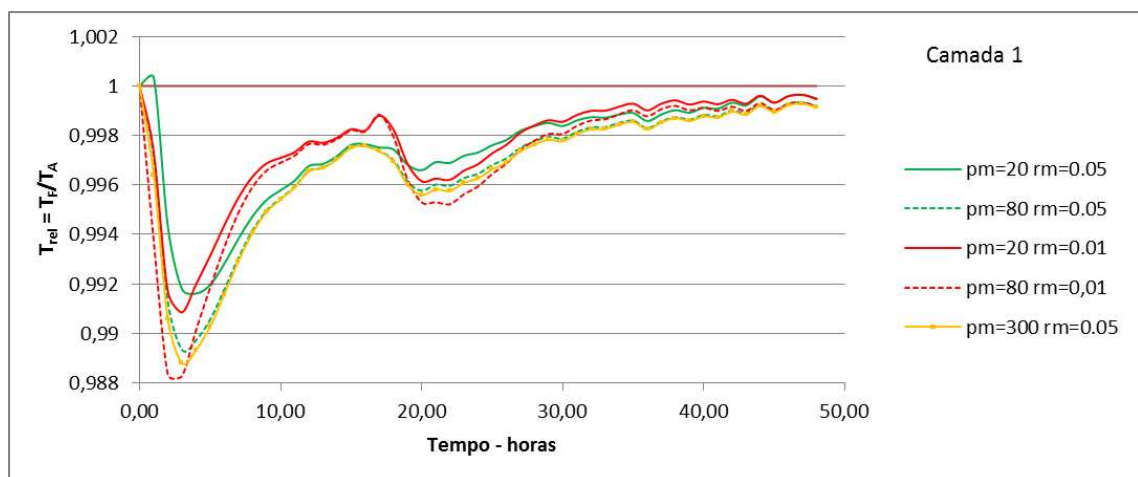


Figura 4.19: Gráfico de aproximação para a primeira camada com os parâmetros iniciais 2 e 3.

Facilmente se percebe pela Figura 4.19, que não existem ganhos significativos ao refinar mais a malha e a hora, pelo menos para esta camada. Assim, de forma excepcional para um refinamento de malha (rm) de 0.05 é feito um refinamento da hora (pm) de 300 como forma de retirar melhores conclusões para este grau de refinamento. À partida obter-se-iam melhores resultados se fosse feito este refinamento horário acompanhado

do refinamento de malha de 0.01, mas seria impossível fazer essa análise na máquina computacional disponível, devido ao excesso de memória e tempo requerido para o efeito e indisponível nesta máquina.

Quanto à análise deste parâmetro inicial ($rm=0.05$ e $pm=300$), também é visível que não surte efeito numa melhoria na aproximação de resultados.

Agora passa-se para uma análise da camada 2 na secção I presente na Figura 4.20.

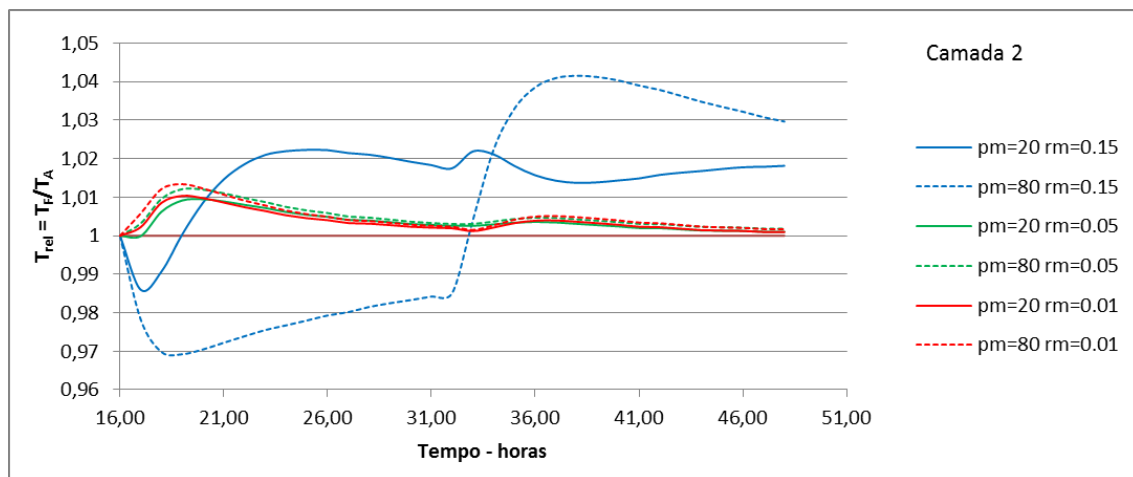


Figura 4.20: Gráfico de aproximação para a segunda camada com os diferentes parâmetros iniciais.

Na Figura 4.20 é visível que para os parâmetros iniciais 1, ou seja, refinamentos de malha da ordem de 0.15, as aproximações não são tão boas. São então retirados os parâmetros iniciais 1, para ver com maior detalhe o que acontece com os outros parâmetros iniciais, Figura 4.21.

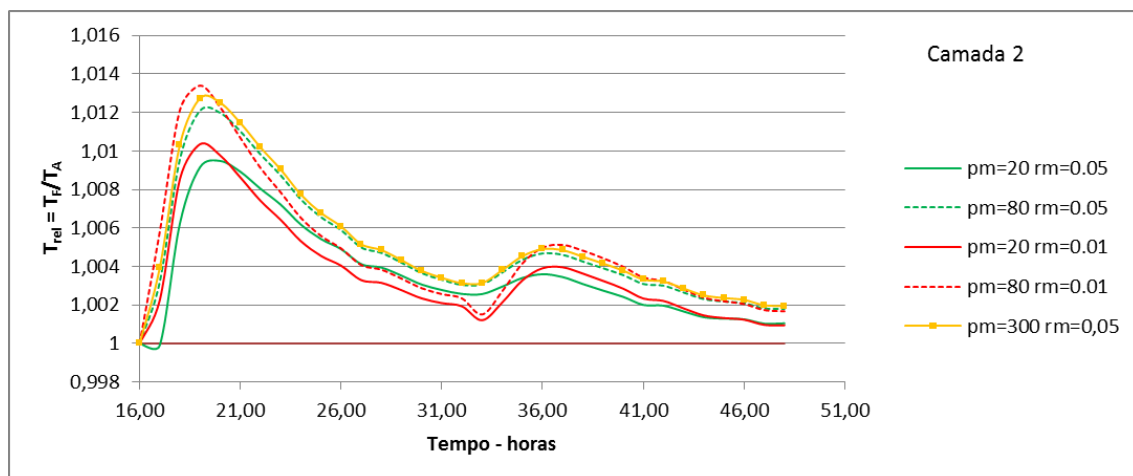


Figura 4.21: Gráfico de aproximação para a segunda camada com os parâmetros iniciais 2 e 3.

Na Figura 4.21, mantém-se uma certa indistinção entre linhas sem se poder retirar conclusões solidas entre qual o melhor refinamento a utilizar. Pode-se apenas observar que com o refinamento $pm=20$ e $rm=0.05$ descreve-se melhor a subida de temperatura e com o refinamento $pm=80$ e $rm=0.05$ descrevem-se melhor as descidas de temperatura. Com os outros parâmetros os resultados andaram sempre muito próximos uns dos outros.

Quanto à terceira camada, não foi analisada pois não iria acrescentar nenhum pormenor relevante para este estudo.

- Análise dos gráficos de aproximação por cada camada para a secção II

A secção II localiza-se a 0.25m da linha de simetria da peça, ou seja, muito perto do núcleo da peça, sendo aqui onde se faz sentir maiores valores de temperatura.

Na Figura 4.22 está presente o gráfico de aproximação para a secção II da camada 1.

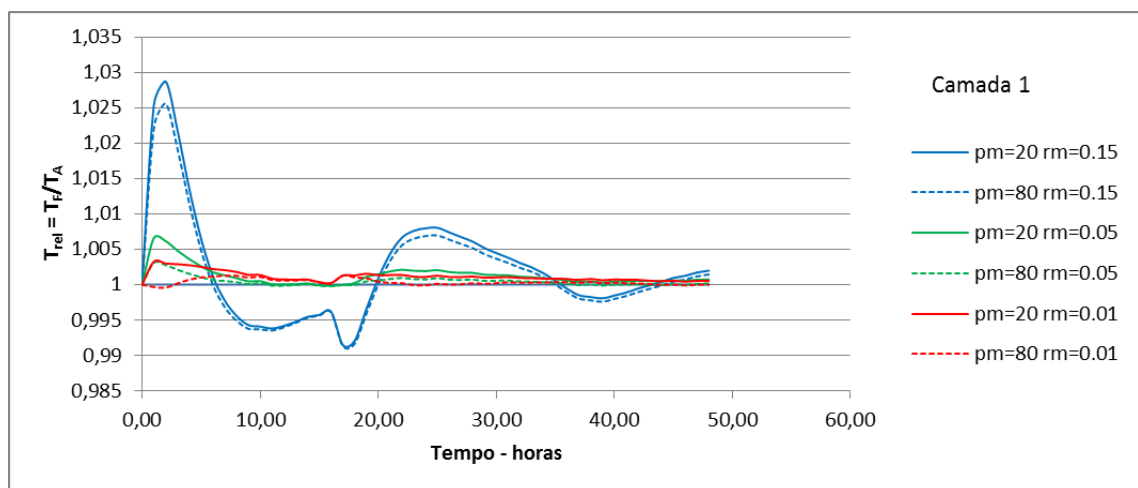


Figura 4.22: Gráfico de aproximação para a primeira camada com diferentes parâmetros iniciais - secção II.

Percebe-se mais uma vez, pela Figura 4.22, que existe maior oscilação do T_{rel} para os parâmetros iniciais 1. Assim, é feito um detalhe na Figura 4.23, para os parâmetros 2 e 3.

Na Figura 4.23, pode-se verificar que o conjunto de parâmetros que melhor se aproximou dos valores de temperatura dados pelo FLAC, é o conjunto 3 para refinamento horário de $pm=80$. À semelhança do que se fez para a secção I, também aqui se pegou no parâmetros inicial 2 e fez-se o refinamento horário de $pm=300$. É notória uma melhor aproximação de valores em comparação ao mesmo refinamento de malha ($rm=0.05$), mas menor refinamento horário ($pm=20$ e $pm=80$). Contudo, em termos de tempo de processamento para este refinamento de malha e refinamento horário de $pm=20$, levou apenas uma hora, ao passo que com refinamento horário de $pm=300$ levou cerca de 35 horas de processamento com o mesmo computador.

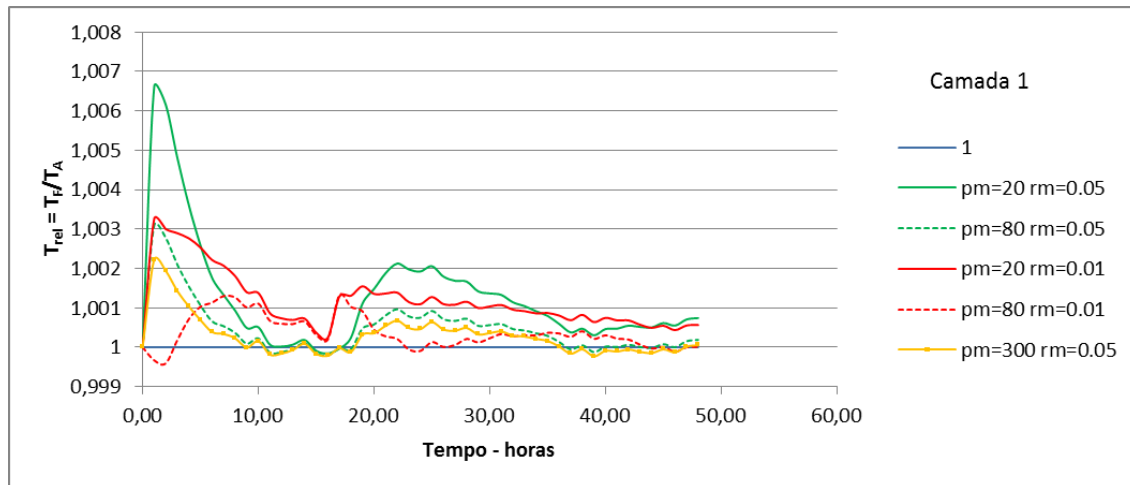


Figura 4.23: Gráfico de aproximação para a primeira camada com os parâmetros iniciais 2 e 3 - secção II.

Quanto ao parâmetro inicial 3, com refinamento horário de $pm=80$, que também teve uma ótima aproximação de valores deve-se referir que o seu tempo de processamento foi de cerca de 11 horas e com um uso bastante elevado de memória computacional dado o seu elevado número de elementos e nós do modelo.

Na Figura 4.24, é apresentada a camada 2 para a secção II, sendo que as conclusões dessa análise são muito idênticas às registadas para a Camada 1. Os parâmetros iniciais 3 com $pm=80$, são as que representam melhores aproximações, enquanto os parâmetros iniciais 1, são as que se desviam mais dos resultados obtidos em FLAC. Além disso, repara-se que com estes parâmetros os maiores desvios à proximidade de resultados acontece sempre momentos depois de se colocar uma camada e depois disso, todos os resultados revelam uma nova tendência de aproximação.

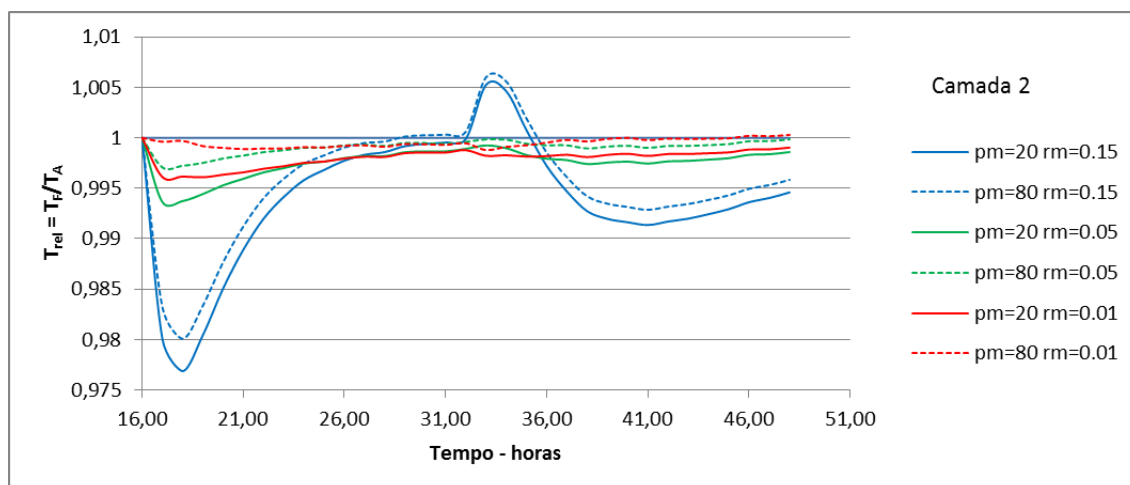


Figura 4.24: Gráfico de aproximação para a segunda camada com diferentes parâmetros iniciais - secção II.

Apresenta-se na Figura 4.25, apenas os parâmetros iniciais 2 e 3, para a sua visualização com maior detalhe.

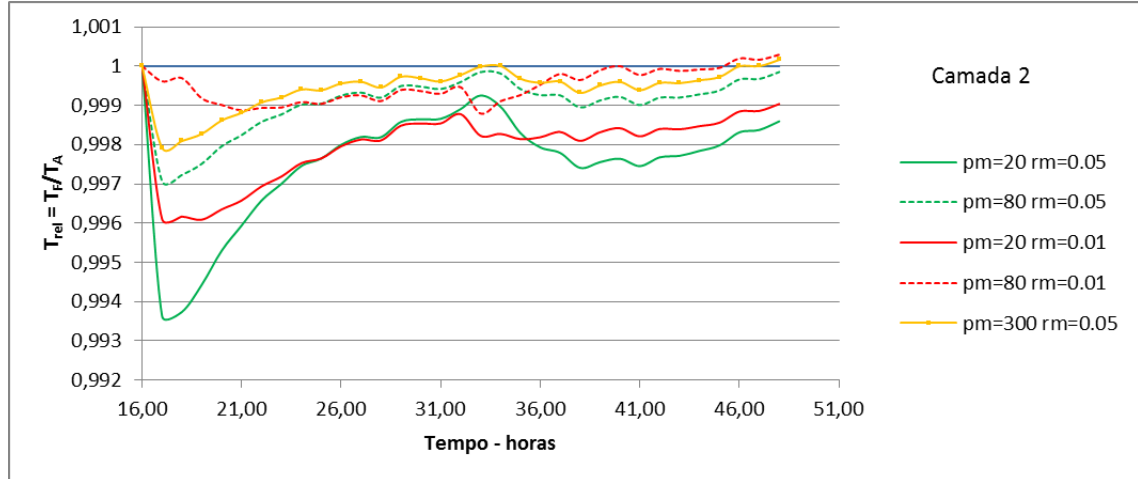


Figura 4.25: Gráfico de aproximação para a segunda camada com os parâmetros iniciais 2 e 3 - secção II.

Na globalidade deste estudo, pode-se retirar as seguintes conclusões:

- O conjunto de parâmetros iniciais 1 já tem um grau de aproximação bastante bom, sem nunca o T_{rel} se desviar mais que 0.04 da unidade. Além disto os tempos de processamento são sempre curtos, próximos de 30 minutos.
- O conjunto de parâmetros iniciais 2 e 3 são quase sempre muito idênticos, não havendo vantagens explícitas no uso de umas em relação as outras. Por isto, o critério de escolha que é relevante é o tempo de processamento e a memória utilizada, assim para futuros estudos com maior número de camadas são aplicados o conjunto de parâmetros iniciais 2, visto que o número 3 ser bastante moroso e exigente em termos de processamento computacional.
- Em consequência do ponto anterior, dentro dos parâmetros iniciais 2 ($rm=0.05$), o refinamento horário a adoptar posteriormente será $pm=20$ pois, novamente, maiores refinamentos não trouxeram muito melhores aproximações e conduziram a tempos de processamento muito maiores. Estes tempos de processamento maiores não se justificam para uma melhoria de resultados tão mínima.

4.4 Processo construtivo de um BCC com 20 Camadas

4.4.1 Apresentação do modelo em ANSYS

Neste subcapítulo é feita a recriação integral do processo construtivo de um BCC, com a rotina de ANSYS desenvolvida e atrás descrita. As propriedades do material usadas são as referidas na tabela 4.2 conforme o trabalho [29]. Como condições de contorno decidiu-se fazer para o período de Verão ($T=25^{\circ}\text{C}$) e com o intervalo de tempo de

colocação de camadas de 16h. Os coeficientes de r_m e p_m são adoptados segundo as conclusões do estudo efectuado em 4.3.4. Assim, os parâmetros de input são:

- $l = 2.5m$;
- $n = 20$;
- $h = 0.3m$;
- $T = 25^\circ C$;
- $p = 16h$;
- $p_m = 20$;
- $r_m = 0.05$;
- Equação de calor - Equação 4.2.

Quanto à estrutura em ANSYS, fica com um total de 20 áreas, 6171 nós e 6000 elementos. como apresentado na Figura 4.26.

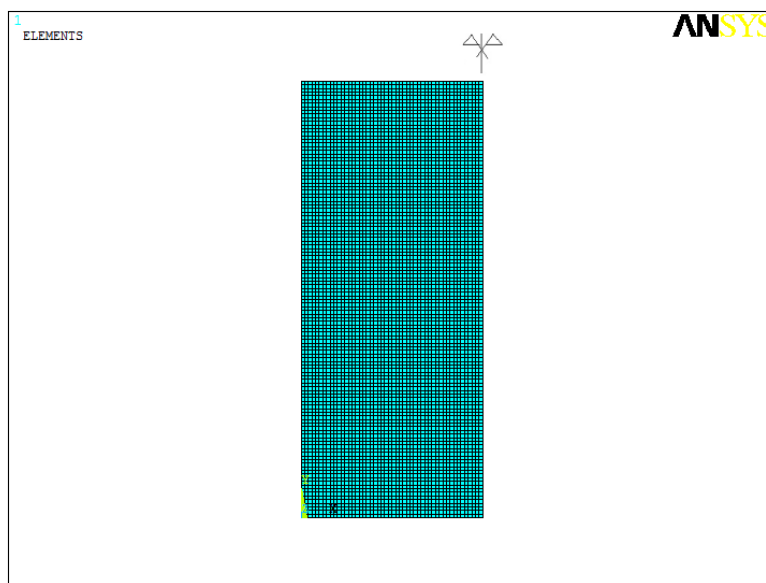


Figura 4.26: Malha de elementos finitos para as 20 camadas em Ansys.

Na Figura 4.27, vem a evolução térmica de cada camada ao longo da sua colocação. A colocação das 20 camadas foi completa até $t=320h$, e o tempo de processamento foi de cerca de 8 horas no mesmo computador usado nas análises anteriores.

Da análise da Figura 4.27, bem como dos valores de temperatura em maior pormenor, consegue-se identificar em que camada ocorre o valor máximo de temperatura e em que hora. Na sequência de colocação destas 20 camadas, a temperatura máxima registada foi de $40,45^\circ C$ e acontece na camada 11 (assinalada na Figura 4.27 com uma linha

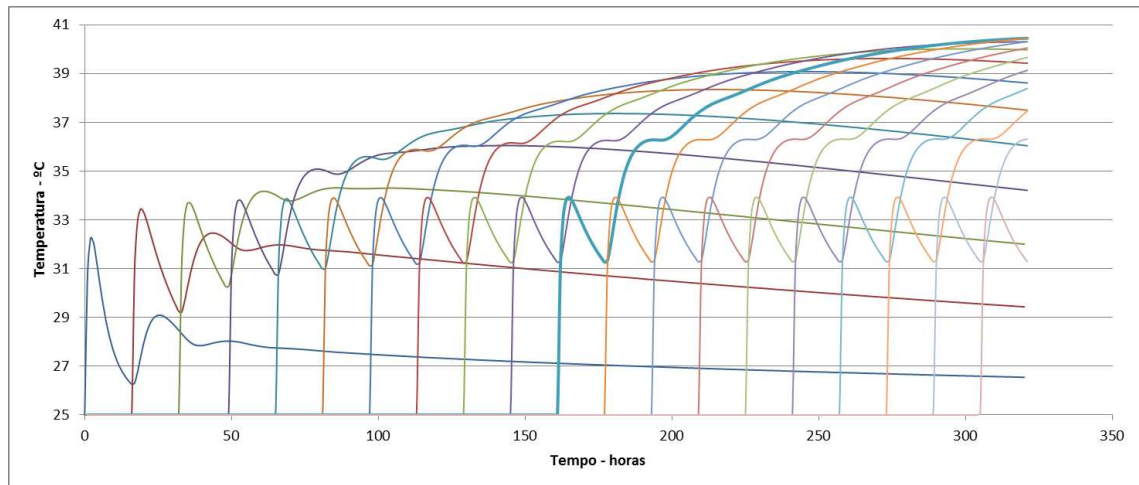


Figura 4.27: Colocação de 20 camadas para a secção II ao longo do tempo até 320 horas em ANSYS.

mais grossa) em $t=320$ horas. Note-se que se está a identificar o máximo de temperatura para um período horário de 320h, pois se este estudo para a colocação das 20 camadas tivesse seguido no tempo mesmo sem a colocação de mais camadas, era expectável que a temperatura continuasse a subir por mais um determinado número de horas até começar a decrescer entrando no período de arrefecimento e consequentemente estabilizar.

Pela Figura 4.27 também se observa o fenómeno já identificado anteriormente na apresentação do modelo (na secção 4.3.3), ou seja, após colocar um determinado número de camadas, as camadas mais perto do núcleo são as que adquirem maior temperatura, mesmo tendo numa fase anterior apresentado uma temperatura mais baixa. Isto pelo facto de estarem mais longe das extremidades e ser difícil libertar essa temperatura. Este fenómeno não acontece devido à curva de hidratação característica deste betão naquela camada em particular, mas sim pela associação das camadas de betão subsequentes. Para este modelo em particular em que existe um intervalo de colocação de camadas a cada 16h, este fenómeno acontece logo na 3ª camada, em que dado a aplicação de uma 4ª camada a temperatura da 3ª camada já sobe mais que a 4ª. Para uma visualização geral da distribuição de temperaturas no modelo de 20 camadas apresenta-se a Figura 4.28.

No caso da modelação que foi feita inicialmente em FLAC, a temperatura máxima registada na secção II foi de 38,39°C, na camada 14 e em $t=320$ horas. O que revela uma diferença de cerca de 2°C entre as temperaturas máximas calculadas e um erro relativo de 5,1%. Visto que a análise feita em ANSYS, devolve uma temperatura superior, pode-se dizer que é um pouco mais conservativa que a feita em FLAC, sendo assim, também está do lado da segurança no caso em que seja feita uma modelação para um caso real de construção de uma barragem em betão BCC.

Agora são analisadas e comparadas algumas das camadas feitas em ANSYS e FLAC, usando de novo a forma de gráfico de aproximação com recurso ao T_{rel} .

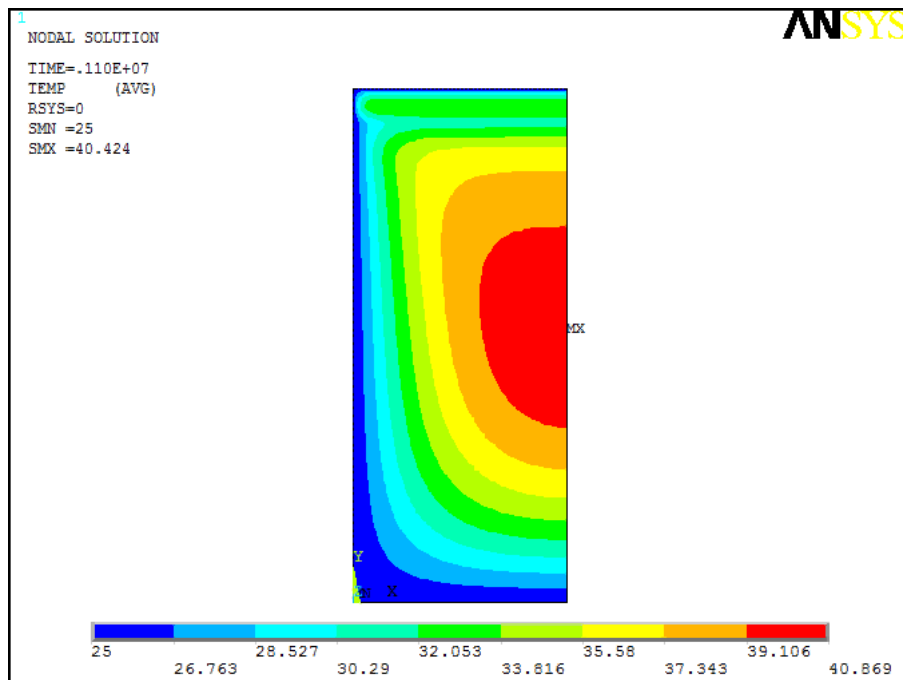


Figura 4.28: Distribuição de temperaturas ao colocar a camada nº20 - 306h.

São escolhidas algumas camadas para proceder a essa análise, entre as quais a camada 5, 11 e 15, conforme apresentadas nas Figura 4.29, 4.30 e 4.31, respectivamente.

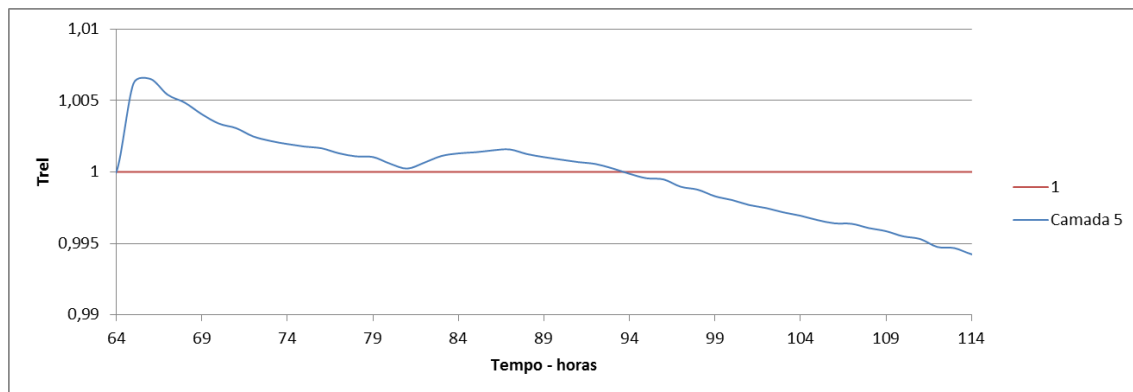
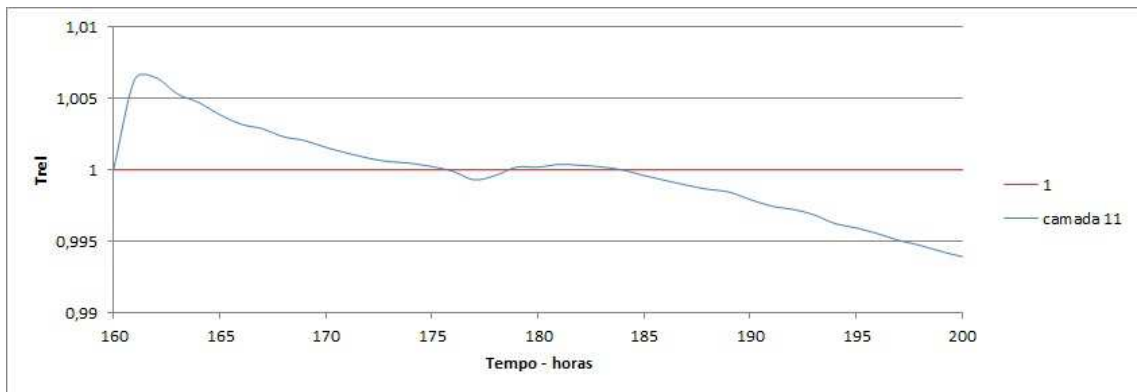
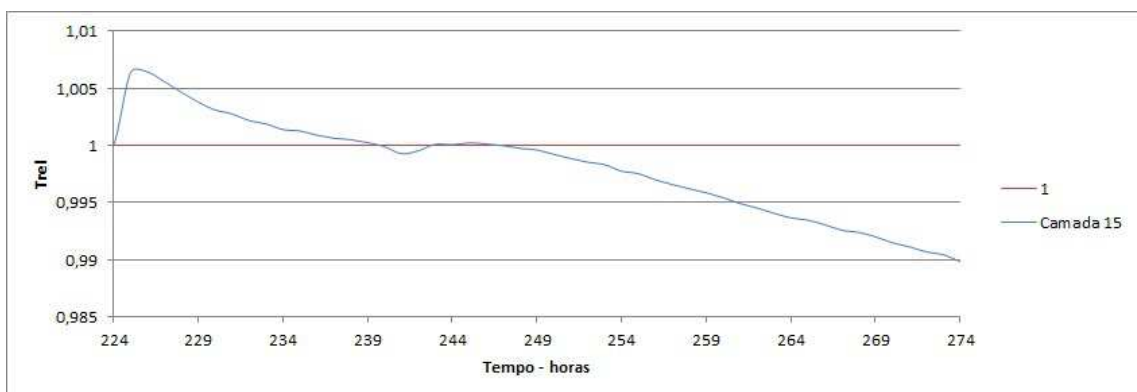


Figura 4.29: T_{rel} da camada 5 ao longo do tempo

Facilmente se observa em todas as figuras relativas às camadas que poucas horas depois de ser colocada uma camada o T_{rel} distancia-se do valor de referência 1, em seguida voltam a aproxima-se desse valor por algumas horas e por fim os valores começam a distanciar-se até ao fim da análise de todas as camadas. Representando assim no fim da análise, uma não concordância entre valores calculados em ANSYS e FLAC, embora seja uma não concordância bastante reduzida, como já exemplificado com a análise da temperatura máxima final, com um erro relativo de apenas 5.1%. Na generalidade pode-se afirmar que a análise em ANSYS é bastante boa, pois tem

Figura 4.30: T_{rel} da camada 11 ao longo do tempoFigura 4.31: T_{rel} da camada 15 ao longo do tempo

uma boa concordância com os valores de FLAC, representando bem a evolução da temperatura para as 20 camadas.

4.4.2 Melhoramento ao modelo inicial

Como referido anteriormente, pela observação da Figura 4.27 até $t=320h$, existe uma tendência no aumento da temperatura máxima situada no núcleo da estrutura. Dada a importância da análise térmica e visto esta temperatura estar ainda em fase crescente, foi feita uma pequena adição às funcionalidades do código criado em Ansys. Esta adição permite o processamento do código para além do tempo de colocação de todas as camadas definidas, assim, a análise da temperatura pode continuar a decorrer no tempo, mesmo sem ter sido adicionadas novas camadas. O que é importante e útil na análise térmica após a conclusão da construção de uma barragem feita por camadas.

Acresce nova propriedade ao input do código em Ansys:

- q - é o valor que multiplicado à propriedade "p" dá o número de horas a mais de processamento da análise térmica depois da colocação de todas as camadas.

Com esta nova propriedade, o código em Ansys é novamente calculado para um $q = 6$, ou seja, para que a análise térmica se desenvolva para 96 horas depois da colocação da última camada (um total de $t=416h$). Em seguida apresenta-se a Figura 4.32 com a visualização da distribuição de temperaturas na estrutura, já depois de ter cessado a colocação de camadas.

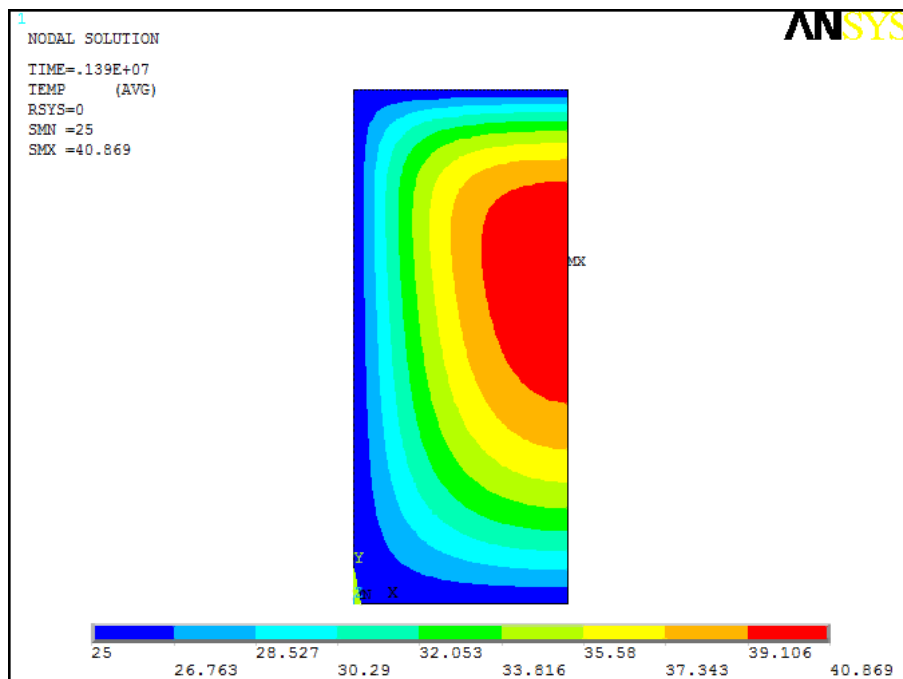


Figura 4.32: Distribuição de temperaturas no momento que ocorre máxima temperatura (40.87°C)- 387h.

Através da Figura 4.32, também se confirma que a temperatura no núcleo continuou em fase de crescimento até ter chegado aos 40.87 °C para um $t=387$ horas, ou seja, cerca de 67 horas depois de se ter colocado a última camada. Após este momento todos os pontos da estrutura entram numa fase de redução da temperatura. Já antes de $t=387$ horas se conseguia perceber que nas zonas perto das extremidades já a temperatura diminuía ao longo do tempo tendendo para a temperatura ambiente de 25°C.

Deve-se referir que o tempo de processamento para a análise de tempo de $t=416$ horas foi de 10 horas, utilizando o computador descrito no início do Capítulo. Na Figura 4.33 mostra-se a evolução da temperatura das 20 camadas na secção II até $t=416$ horas e evidencia-se a camada em que ocorre o pico de temperatura, a nº 13.

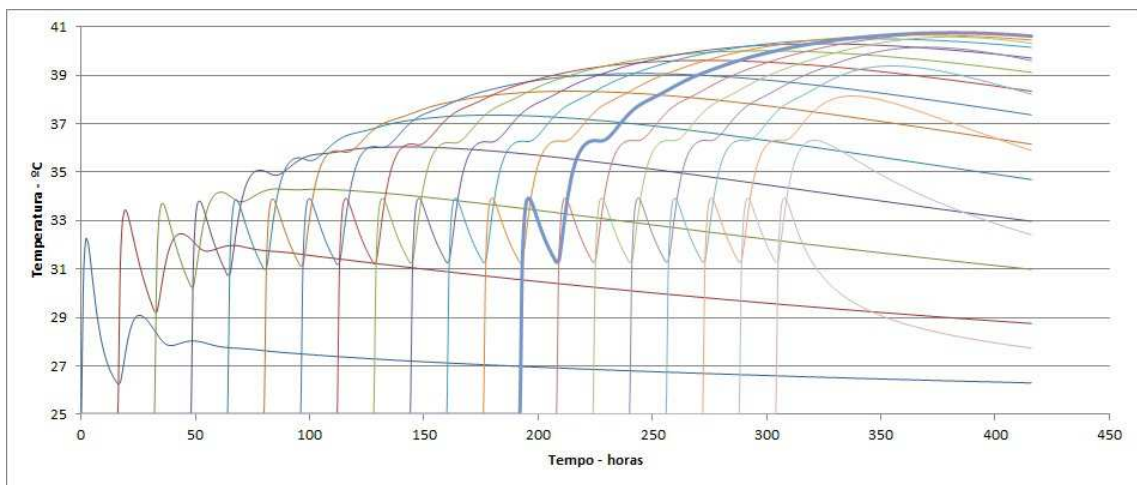


Figura 4.33: Colocação de 20 camadas para a secção II ao longo do tempo até 416 horas em ANSYS.

É bastante claro que a rotina criada em Ansys com o uso da funcionalidade *Birth & Death* consegue simular de forma correcta e muito precisa os fenómenos térmicos originados durante a sequência de colocação de 20 camadas de betão, ou seja, uma sequência de construção de uma possível barragem BCC. Sempre à luz dos resultados obtidos em FLAC pelo trabalho [29].

Foi criada uma rotina que está preparada para fazer diversos tipos de estudos, desde o número de camadas a colocar, ao comprimento e altura de cada camada, temperatura ambiente, intervalo de tempo entre camadas e tempo total de análise térmica, são estes os diferentes parâmetros que podem ser conjugados e com isso realizar diferentes estudos e assim obter conclusões importantes para o estudo da colocação por camadas do betão BCC. Consoante a disponibilidade de processamento do utilizador podem ser sempre refinados os resultados em termos de refinamento de malha (rm) e de hora (pm).

No Apêndice B mostra-se toda a rotina desenvolvida ao longo do Capítulo 4.

Capítulo 5

Aplicação da metodologia em ANSYS a uma Barragem

5.1 Implementação em ANSYS

Nesta secção será implementada a metodologia desenvolvida no Capítulo 4 a um caso de estudo real. É aplicado à única barragem completa de betão compactado com cilindros construída em Portugal, ou seja, a barragem do Pedrogão localizada 20 Km a jusante da barragem do Alqueva no Rio Guadiana (Figura 5.1). Será desenvolvida uma Análise Térmica bem como uma Análise Estrutural a este caso de estudo.

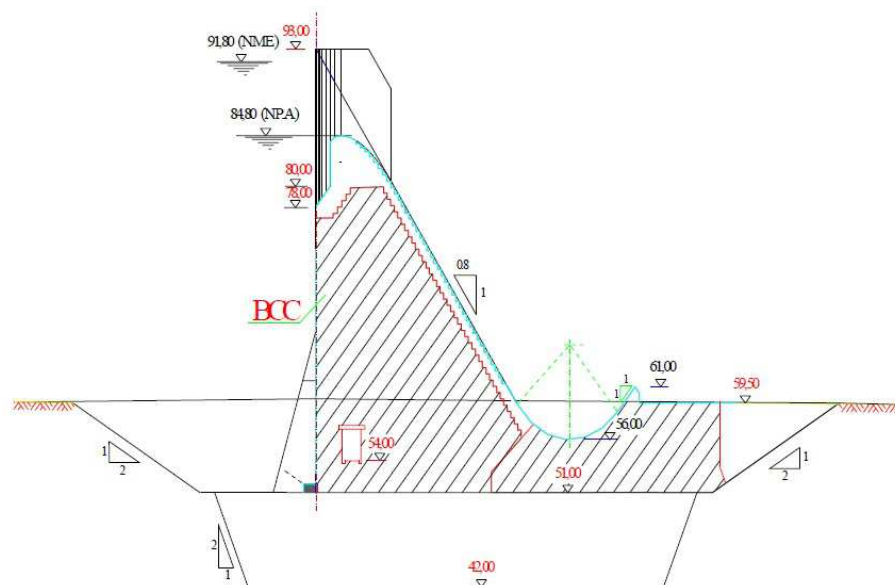


Figura 5.1: Secção transversal da barragem do Pedrogão - Fonte: www.inag.pt.

Para a resolução deste caso de estudo existia a possibilidade de criação de um modelo bi-dimensional ou tri-dimensional dadas as boas capacidades de resolução em ANSYS. Opta-se pela via bi-dimensional, pois segundo [19] ambos os modelos podem chegar a resultados bastante idênticos com diferenças muito pouco significativas e sendo este um

modelo com um numero menor de elementos torna-se mais conveniente do ponto de vista computacional.

Importa esclarecer que ao contrario do Capítulo 4, para a resolução da rotina descrita em seguida, foi usada uma maquina computacional diferente e todos os tempos de resolução enunciados devem-se enquadrar com as características da mesma. Assim, esta maquina possui melhores capacidades do ponto de vista técnico para uma resolução mais célere da rotina descrita. Detendo as seguintes características:

- Intel Core I5 CPU 650 3.20 GHz
- 4.00 GB de memória RAM instalada

Para a construção do modelo da barragem do Pedrógão foi utilizada a mesma sequência de análise apresentada no Capítulo 4, porém a parte de discretização da estrutura deve ser alterada, bem como as propriedades do betão a utilizar devem adaptadas as que realmente foram utilizadas in situ. Assim, quanto às características gerais do betão utilizado estão presentes num relatório efectuado pelo LNEC em [27] e discriminadas em seguida:

- Condutibilidade Térmica
- Calor Específico
- Densidade
- Modulo de Elasticidade
- Coeficiente de Poisson
- Coeficiente de Dilatação Térmica

Para a definição da geometria da estrutura em ANSYS optou-se por se fazer por meio de *Keypoints*, com base nas informações dos desenhos de projecto da barragem do Pedrógão (Figura 2.18).

Os *Keypoints* são um recurso disponível no ANSYS, em que cada keypoint é apenas um ponto com uma coordenada associada, como mostra a Figura 5.2-(a). Ao unir estes pontos podem-se criar linhas e a junção de quatro linhas cria uma área. Neste caso da barragem temos áreas sobrepostas de diferentes comprimentos, conforme a Figura 5.2-(b), definindo assim a geometria exterior da barragem que é construída com betão compactado com cilindros. Cada camada tem uma altura de 30 cm e consequentemente a estrutura divide-se em 96 áreas, onde cada camada corresponde a uma área.

Como condições iniciais e de contorno na sequência apresentada no Capítulo 4, apenas existia a temperatura inicial de colocação do betão que funcionava também como temperatura ambiente. Nesta rotina para o caso real fez-se uma melhoria no modelo para torna-lo mais fiel às condições de temperatura reais. Assim, são criados dois novos parâmetros iniciais:

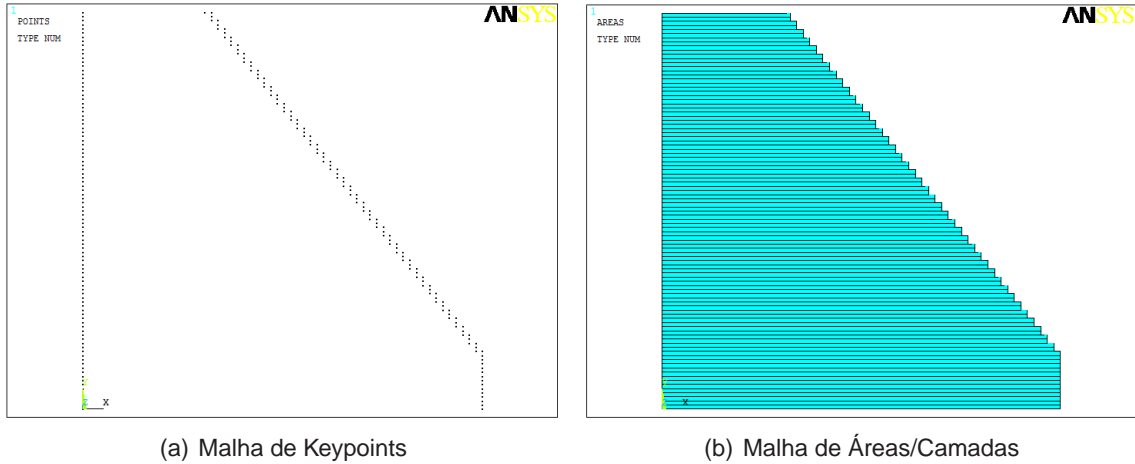


Figura 5.2: Definição da barragem do Pedrógão em ANSYS.

- t_a - Temperatura média ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
- t_b - Temperatura do betão fresco no momento da betonagem ($^{\circ}\text{C}$)

No âmbito deste trabalho, são consultadas as Normais Climatológicas de Beja [22], usando a média mensal de temperatura para os meses em que decorreu a colocação do BCC (Abril - Agosto). Sendo calculada a temperatura média ambiente (t_a), como indicado na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Temperaturas médias mensais de Abril a Agosto e temperatura média do mesmo período - ($^{\circ}\text{C}$)

Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Média - t_a
14.3	17.9	22.1	24.2	25.3	20.8

A temperatura do betão fresco (t_b) também é um factor importante a ter em conta, pois a temperatura dos agregados em estaleiro, do esmagamento dos mesmos e do transporte traz frequentemente um acréscimo de temperatura podendo esta na altura de colocação do betão ser superior à temperatura ambiente que se faça sentir. Segundo [15] e [18] é usada uma equação que a determina tendo em conta diversos outros parâmetros e temperaturas (equação 5.1).

$$T_{\text{betonagem}} = T_{\text{anual}} - \frac{2}{3} (T_{\text{anual}} - T_{\text{mensal}}) + T_{\text{agregados}} + T_{\text{mistura}} + T_{\text{transporte}} \quad (5.1)$$

Onde:

- T_{anual} - Temperatura média anual
- T_{mensal} - Temperatura média mensal
- $T_{\text{agregados}}$ - Temperatura proveniente da trituração dos agregados

- $T_{mistura}$ - Temperatura proveniente da mistura dos agregados
- $T_{transporte}$ - Temperatura proveniente do transporte da mistura

Na tabela 5.2 apresenta-se a aplicação da formula de calculo da equação 5.1 em especifico para os meses de colocação do BCC na barragem do Pedrógão. Mais uma vez a T_{anual} e a T_{mensal} obtidas com base nas Normais Climatológicas de Beja. Já as outras temperaturas também são retiradas de [15] e [18].

Tabela 5.2: Parâmetros de calculo da temperatura de betonagem - ($^{\circ}\text{C}$)

	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Média - t_b
T_{anual}	16.45	16.45	16.45	16.45	16.45	
$\frac{2}{3}(T_{anual} - T_{mensal})$	-1.64	0.30	3.06	5.16	5.20	
$T_{agregados}$	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	
$T_{mistura}$	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	
$T_{transporte}$	0.6	1.1	1.1	1.7	1.7	
$T_{betonagem}$	17.6	20.1	22.8	25.5	25.6	22.3

Em seguida são apresentados os parâmetros de calculo necessários para a sequência de analise poder ser efectuada.

- $p=15\text{h}$
- $t_a=20.8^{\circ}\text{C}$
- $t_b=22.3^{\circ}\text{C}$
- $pm=5$
- $rm=0.5$
- $q=140$

Para o intervalo de tempo (p) aplicado neste modelo foi definido 15 horas, pois é o dado oficial que consta em [27]. Quanto ao facto de se escolher para extensão horária (q) o valor 140, significa se está a fazer a modelação da barragem do Pedrógão para 2100 horas depois da colocação da última camada. Este valor foi definido de forma a que a modelação se realize até a temperatura começar a diminuir em todos os pontos da barragem contemplando assim o pico de temperatura no seu núcleo.

Assim, sabendo que a malha em ANSYS se divide em 96 áreas/camadas e cada uma é colocada a cada 15 horas, mais as 2100 horas dadas pela propriedade de extensão horária, perfaz um total de 3540 horas para o qual a análise térmica decorre.

Deve-se referir que estas análises foram realizadas numa versão de ANSYS universitária, existindo um limite no número de elementos permitidos analisar. Desta forma, foi apenas possível fazer o refinamento de malha (rm) indicado. Quanto ao refinamento horário (pm) também é reduzido devido ao espaço do disco ser limitado. Sabe-se que com isto se pode estar a realizar uma modelação menos precisa do que seria o ideal. No fim, com estes dados este modelo é constituído por:

- 3962 elementos,
- 4117 nós.

A curva de hidratação a usar neste modelo foi a mesma adoptada em [29], visto que para o betão que foi usado na obra de Pedrogão não existem dados laboratoriais disponíveis sobre a mesma, em [17] admite-se que não foram realizados ensaios ao betão para se determinar o calor de hidratação. Segundo [27] ao longo da construção foram usados três tipos de betão, definidos como BCC2, BCC3 e BCC1-A. Está registado que no projecto original estava definido usar apenas o betão BCC2 e foi usado em maior quantidade. Aplicado desde o início da obra em Abril de 2004, até mais de metade da altura total da barragem em Julho do mesmo ano. Nesse momento devido à dificuldade em encontrar filer com granulometria fina, associada ao tempo chuvoso e à escassez em estaleiro começou a ser utilizada a composição BCC3 com maior percentagem de ligante. A composição BCC1-A foi usada apenas em algumas partes da obra e foi aplicado devido ao facto de ter havido atrasos na obra e estar-se a realizar a colocação de camadas num tempo mais quente, sabe-se que é o betão que maior quantidade de ligante possuía. Para esta sequência, estamos a introduzir esta limitação de se simular a aplicação de apenas um tipo de betão na sua totalidade e para isso se usar apenas uma curva de hidratação do betão, a já descrita anteriormente.

Durante a construção deste modelo foram sendo introduzidas algumas simplificações face à barragem real. Simplificações que à partida podem influenciar a precisão dos resultados, mas que não diminuem a qualidade do modelo na sua globalidade, como se poderá verificar nas secções 5.2 e 5.3. Introduzem-se simplificações tanto para a análise térmica como para a estrutural e são as seguintes:

1. Simplificações Térmicas

- Como condição de contorno é aplicada uma temperatura média ambiente, quando na realidade a temperatura sofre oscilações diárias e sazonais.
- Também como condição de contorno a temperatura é aplicada na superfície como constante (Condição de Dirichelet - Capítulo 3), ao passo que para uma melhor aproximação à realidade se pode assumir um fluxo de calor convectivo entre a superfície e o meio ambiente (Lei de Convecção de Newton - Capítulo 3), mas para tal deve-se usar um coeficiente de convecção que pode variar em função as condições meteorológicas sentidas ao longo da construção (por ex: velocidade do vento).
- A curva de geração de calor aplicada não é a característica do betão usado na barragem, por ausência desses dados.
- Para a base da barragem é adoptada a mesma condição de contorno definida para o resto da estrutura.

2. Simplificações Estruturais

- Sabe-se que o módulo de elasticidade do betão varia com a idade do mesmo, bem como que o seu valor não varia linearmente com o tempo, por questões

de simplicidade do modelo optou-se por assumir um valor constante de módulo de elasticidade para a análise estrutural. Do mesmo modo não foram tidos em conta as propriedades de fluência e relaxação do betão.

5.2 Análise Térmica

Para a análise térmica foram introduzidos todos os dados anteriormente definidos no input da sequência térmica, incluindo as propriedades características do betão utilizado, presentes na tabela 5.3.

Tabela 5.3: Propriedades Térmicas do Betão - BCC2

Condutibilidade Térmica	Calor Específico	Densidade
$2.3 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$	$921 \text{ Jkg}^{-3}\text{K}^{-1}$	2400 kg/m^3

Neste seguimento, o modelo numérico criado foi processado em apenas 6 horas e os resultados obtidos foram comparados com os observados durante a construção da barragem. Estes valores foram registados por meio de termómetros deixados em determinados pontos chave da barragem, como indicado na Figura 5.3. Tais valores foram consultados em [17] para poderem ser comparados com os do modelo numérico descrito neste trabalho. Estas comparações apresentam-se nas Figuras 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7.

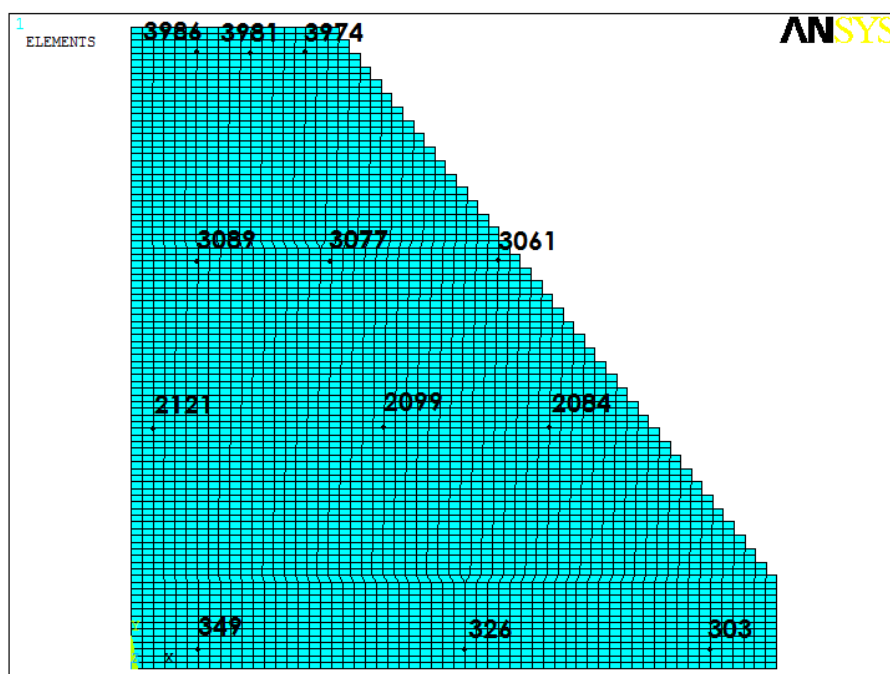


Figura 5.3: Malha de elementos finitos em Ansys aplicada a barragem do Pedrógão.

Da análise dos gráficos comparativos consegue-se perceber que apesar das simplificações introduzidas no modelo, existe em geral uma boa concordância entre os

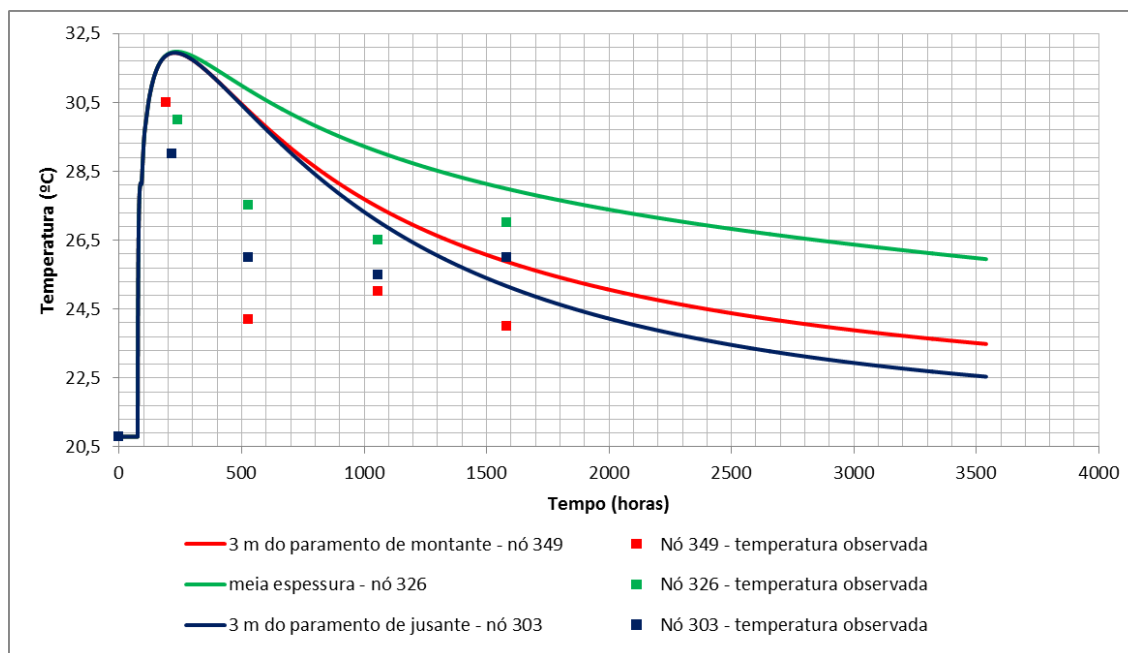


Figura 5.4: Evolução das temperaturas observadas e calculadas à cota 52,5 m.

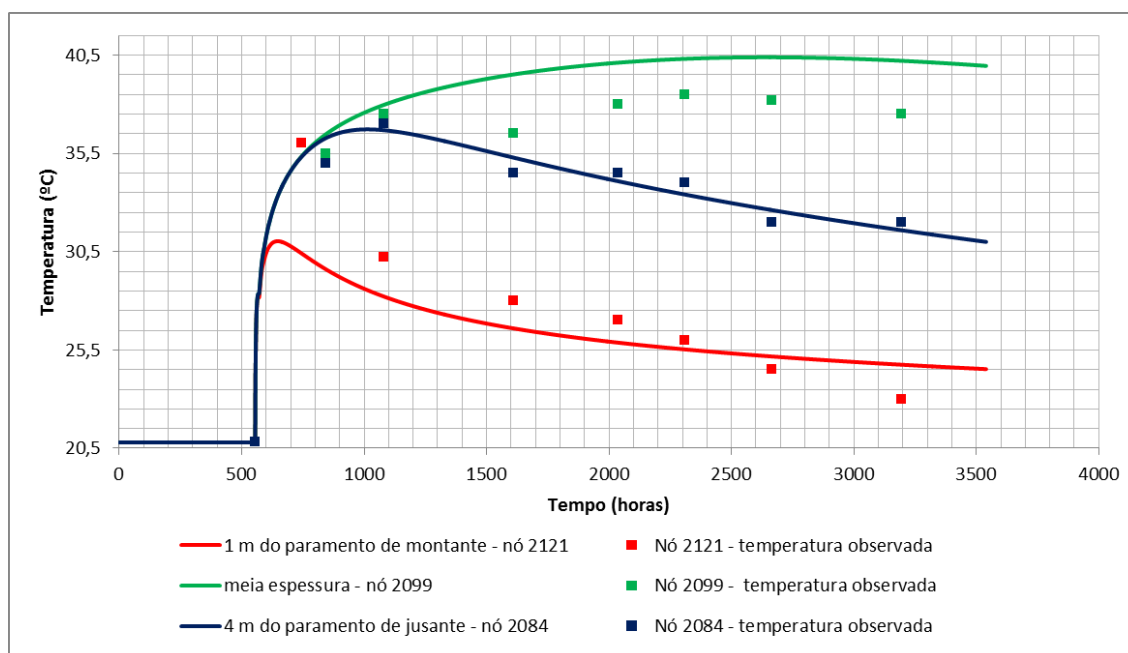


Figura 5.5: Evolução das temperaturas observadas e calculadas à cota 62 m.

valores do modelo numérico e os observados na barragem real. Uma das simplificações que menos concordância pode trazer é a não utilização da real curva de geração de calor do betão. Outros pontos que também mostram uma menor concordância, são aqueles que se situam a apenas 1 metro do paramento, o nº 2121 da Figura 5.5 e o nº3061 da Figura 5.6. Devido ao facto de estarem junto à superfície e neste modelo não se ter

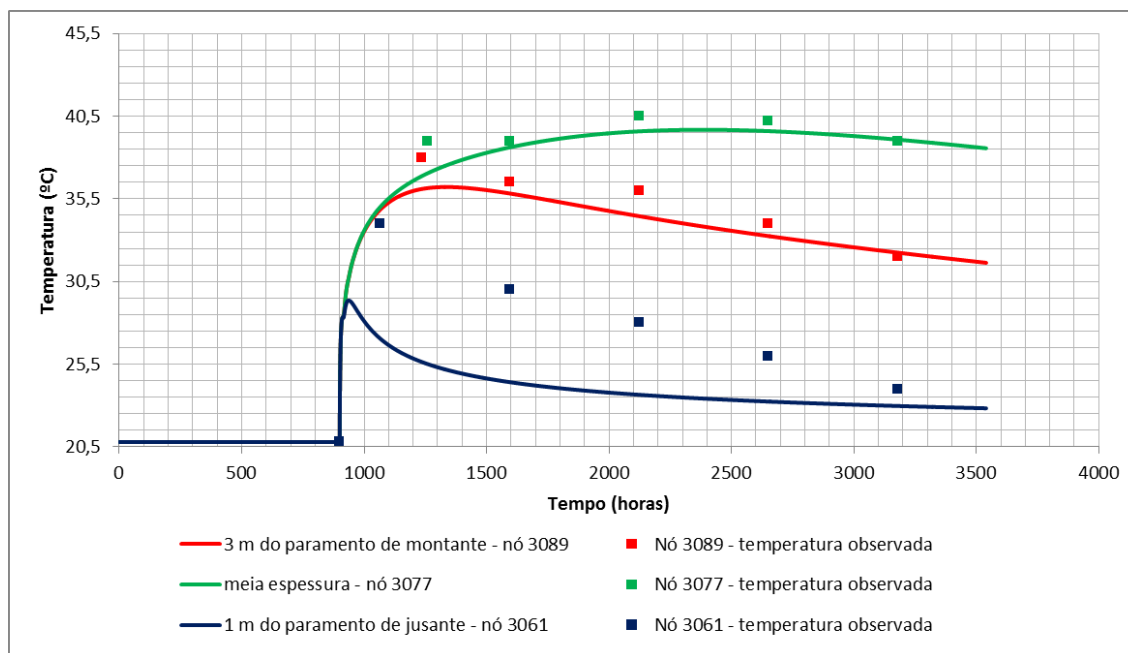


Figura 5.6: Evolução das temperaturas observadas e calculadas à cota 69 m.

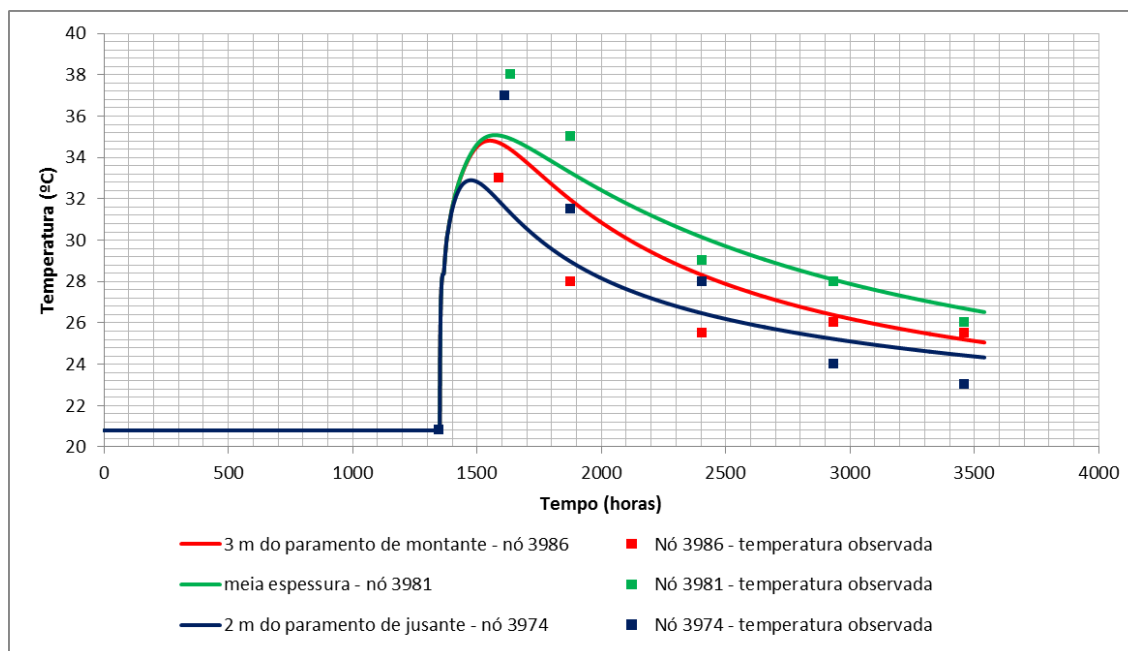
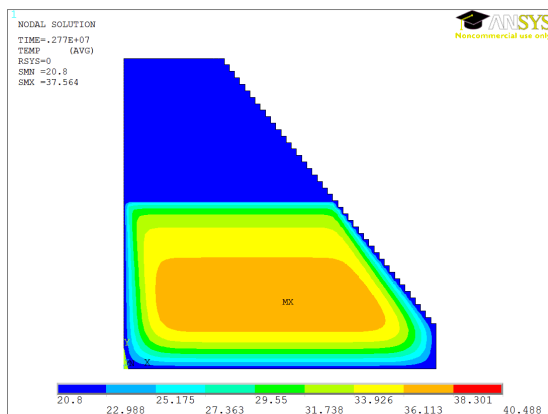


Figura 5.7: Evolução das temperaturas observadas e calculadas à cota 78 m.

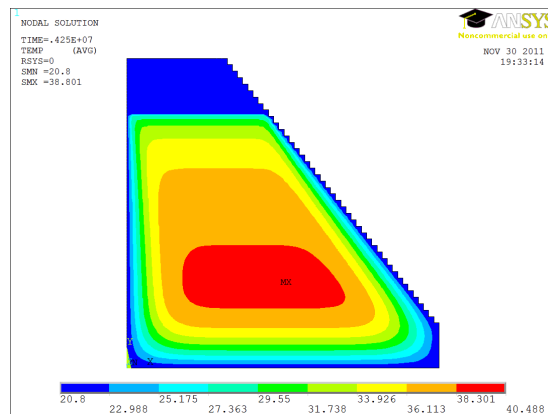
em conta as oscilações diárias de temperatura. Já os pontos que se situam mais no interior da estrutura, por exemplo os localizados a meia espessura, são os que melhor reproduzem as variações de temperatura ao longo do tempo.

Na Figura 5.8 ilustra-se a evolução da temperatura ao longo da construção da barragem

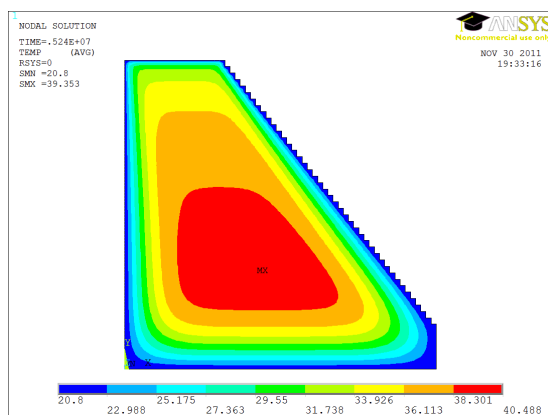
segundo a rotina criada em ANSYS.



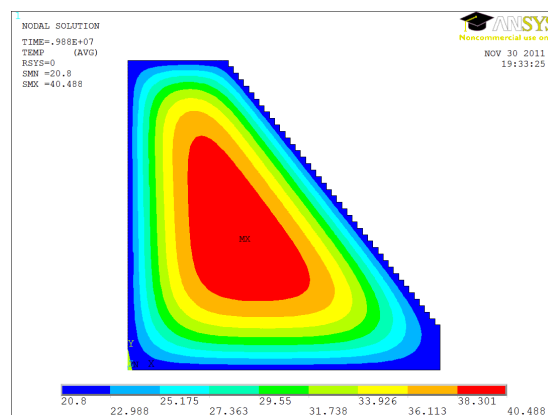
(a) Colocação da camada nº51 - $t=770h$



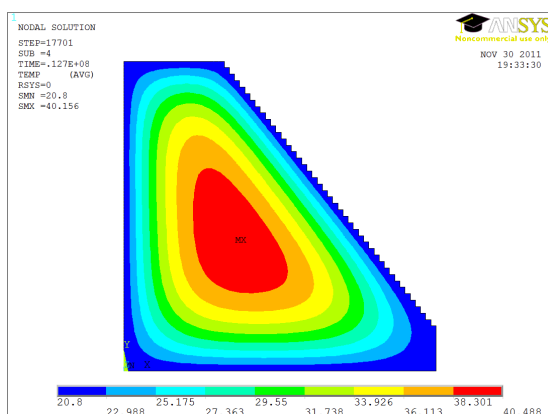
(b) Colocação da camada nº78 - $t=1180h$



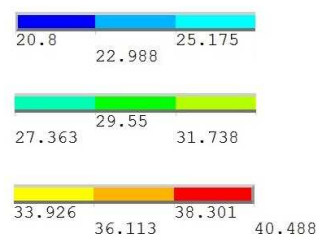
(c) Colocação da ultima camada - $t=1456h$



(d) Momento onde se sente a máxima temperatura - $t=2745h$



(e) Fim da análise térmica - $t=3540h$



(f) Grelha de temperatura para as figuras anteriores - $^{\circ}C$

Figura 5.8: Evolução das temperaturas no corpo da barragem ao longo da sua construção.

Pela análise das imagens da Figura 5.8 consegue-se entender que no processo de colocação de camadas a temperatura eleva-se, acumulando-se no núcleo da estrutura. Ao contrário das zonas junto à superfície, que são as que perdem a temperatura mais rapidamente.

Devido à elevação adiabática da temperatura, esta continua a crescer mesmo quando já cessou a colocação de camadas de betão. Como se pode ver na Figura 5.8-(c) em $t=1456$ horas é concluída a colocação de camadas e só em $t=2745$ horas na Figura 5.8-(d) se mostra que se atingiu a temperatura máxima de 40.88°C . Após este momento assiste-se a um continuo decréscimo da temperatura até $t=3540$ horas, que demarca o fim da análise térmica, podendo-se presumir que a temperatura continuaria o seu decréscimo até estabilizar com a temperatura do meio ambiente.

5.3 Analise Estrutural

Ao realizar um análise estrutural devem ser controladas as tensões à compressão e à tracção. Se as tensões à compressão ultrapassarem o limite da sua resistência, podem levar ao esmagamento do betão quebrando a sua integridade, e se as tensões à tracção estiverem em excesso, podem provocar uma fissuração demasiado elevada e comprometer a segurança da barragem. Neste seguimento uma forma de conseguir avaliar a probabilidade de fissuração de um betão é usando o índice da equação 5.3, já usada noutros trabalho onde uma avaliação estrutural é necessária, por exemplo [25].

$$I_{fissuracao} = \frac{f_{ct}(t)}{\sigma_t(t)} \geq 1.0 \quad (5.2)$$

Sendo:

- $f_{ct}(t)$ - a resistência à tracção no momento t
- $\sigma_t(t)$ - a tensão à tracção num determinado ponto e no momento t

Assim, com este índice de fissuração pode ser avaliada a probabilidade de ocorrência de fissuras sempre que o seu valor seja inferior a 1. O mesmo tipo de avaliação pode ser executada mas para o caso de tensões de compressão, como se apresenta em seguida:

$$I_{esmagamento} = \frac{f_c(t)}{\sigma_c(t)} \geq 1.0 \quad (5.3)$$

Sendo:

- $f_c(t)$ - a resistência à compressão no momento t
- $\sigma_c(t)$ - a tensão à compressão num determinado ponto e no momento t

Deve-se referir que o ANSYS adopta valores negativos para a representação da tensão à compressão, o que significa que para o calculo do $I_{esmagamento}$ se deve usar os valores de tensão à compressão em módulo. Este último índice não costuma ser tão avaliado visto que as tensões à tracção são muito mais criticas neste tipo de estrutura.

Para a resolução da análise estrutural é criada uma sequência também em ANSYS APDL, é uma rotina que se aplica depois da análise térmica concluída pois usa a mesma malha usada nessa análise, bem como os valores de temperatura aí obtidos e aplica-os nesta análise estrutural como cargas nodais. Esta sequência apresenta-se no fluxograma da Figura 5.9 e descreve-se com maior detalhe em seguida:

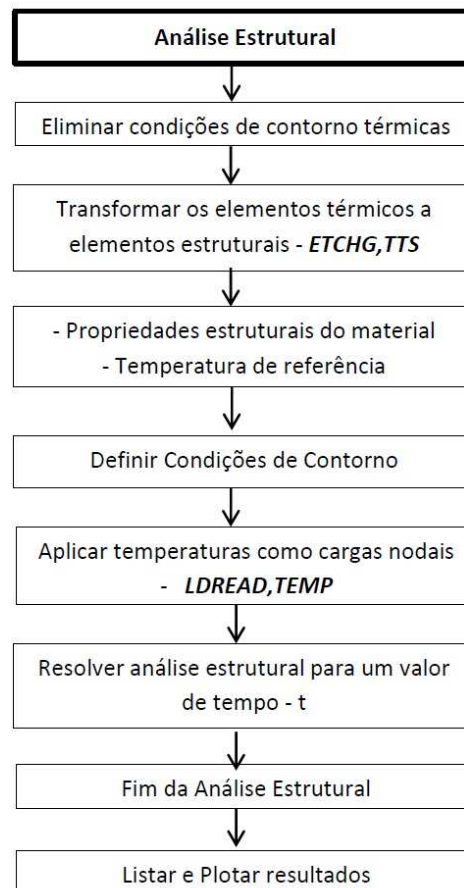


Figura 5.9: Sequência da análise estrutural em Ansys

1. São eliminadas todas as condições de contorno térmicas aplicadas seja nas áreas ou nas linhas dos elementos;
2. Substituem-se os elementos térmicos (PLANE 55) constituintes da malha, por elementos estruturais (PLANE 182) com o auxílio do comando *ETCHG,TTS* que tem a vantagem de o fazer de forma totalmente automática;
3. Definição das propriedades estruturais dos materiais:
 - Módulo de Elasticidade;
 - Coeficiente de Poisson;
 - Coeficiente de Dilatação Térmica;

4. Definição de uma temperatura de referência a partir do qual se calculam tensões térmicas, caso contrario a temperatura térmica definida por defeito é 0°C - neste caso é usada a temperatura mais baixa entre a temperatura média ambiente e a temperatura de betonagem;
5. Definir as condições de contorno - neste caso da barragem restringe-se os deslocamentos em x e y da linha junto à base da barragem;
6. Aplicar condição de simulação da gravidade e peso próprio da estrutura com o comando *ACEL*;
7. Definir um tempo t para o qual se quer fazer a análise estrutural;
8. Aplicar as temperaturas do tempo t como cargas nodais, usando o comando *LDREAD,TEMP* que aplica as temperaturas a partir do ficheiro de resultados gerado anteriormente na análise térmica;
9. Resolução da análise estrutural para o tempo t;
10. Listar e plotar resultados das tensões sentidas no perfil da barragem para o tempo t.

No caso da propriedade do módulo de elasticidade é aplicado como simplificação um valor constante, foi optado como se mostra na Figura 5.10 pelo seu valor a 365 dias, pois é o ultimo a ser conhecido segundo o relatório [27].

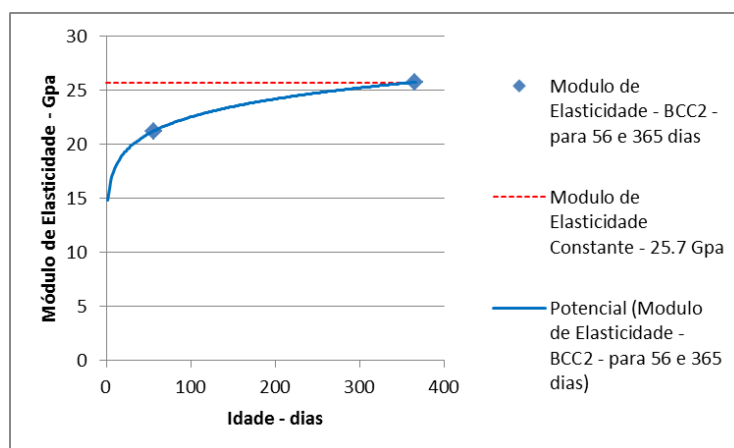


Figura 5.10: Evolução do Módulo de Elasticidade ao longo do tempo.

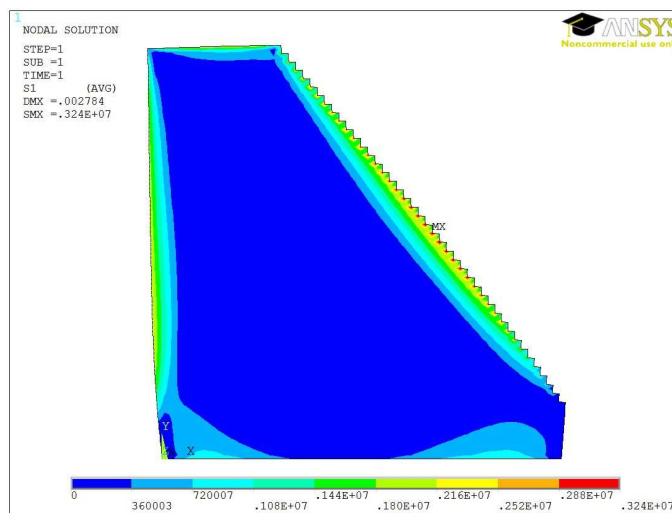
De acordo com o relatório [27] as propriedades a aplicar são as apresentadas na tabela 5.4.

Tabela 5.4: Propriedades Estruturais do Betão - BCC2

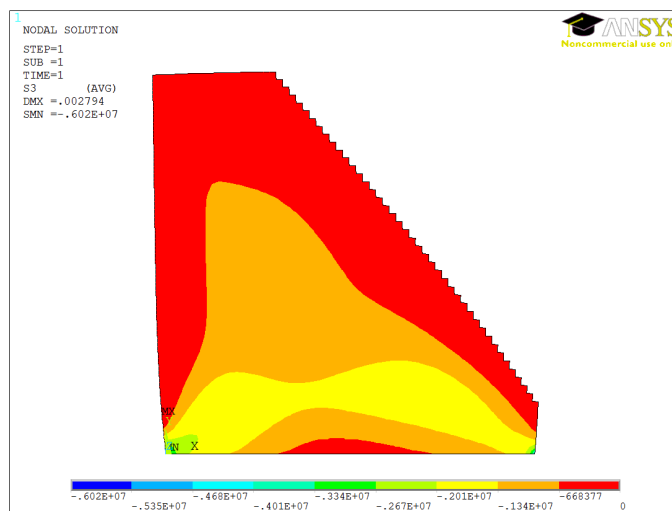
Módulo de Elasticidade	Coefficiente de Poisson	Coefficiente de Dilatação Térmica
25.7 GPa	0.2	1.0E-5 /°C

Nesta fase estão reunidas as condições para se fazer o processamento da malha de elementos finitos e obter os resultados para as tensões à tracção e à compressão. Para esta análise estrutural o tempo de cálculo computacional é muito rápido, apenas alguns segundos, pois cada análise é feita para cada tempo t individualmente.

Para o caso das tensões de tracção e para as tensões de compressão para $t=1456$ horas, vem a Figura 5.11. É escolhido o tempo $t=1456$ pois é quando termina a colocação de camadas de betão.



(a) Tensões de tracção



(b) Tensões de compressão

Figura 5.11: Tensões sentidas no perfil da barragem através da análise estrutural em ANSYS para $t=1456$ horas.

Com base na Figura 5.11-(a) são definidos os diferentes nós para o qual a análise estrutural é mais relevante, ou seja, junto ao paramento de montante, na base junto

ao maciço de fundação, no paramento de jusante e no topo da barragem. Como uma das zona de maior importância a controlar está situada junto do paramento de montante, foram escolhidos dois pontos junto a esse paramento, um a 0.50 m e outro a 1.50 m da extremidade. Os pontos de avaliação relevantes estão presentes na Figura 5.12.

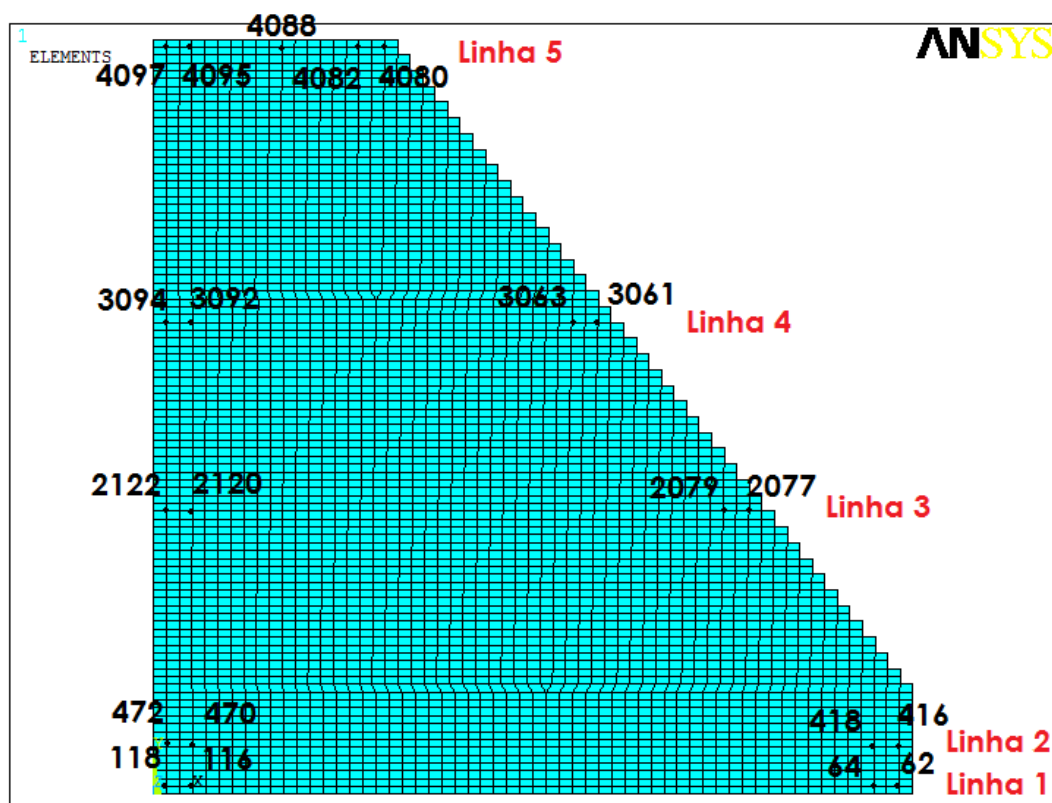


Figura 5.12: Distribuição de nós para a análise estrutural.

Pelo trabalho laboratorial [27] são conhecidos os valores da resistência à tracção e à compressão do betão utilizado, mostrando-se nas Figuras 5.13 e 5.14 a sua evolução com a idade. Com vista a serem comparados com as tensões obtidas pelo ANSYS e ser determinado o $I_{fissuracao}$.

Dos pontos da Figura 5.12, aqueles que sentem maiores valores de tensões à compressão, são os que se localizam mais perto do paramento inferior junto ao maciço rochoso. Como exemplo, o ponto nº 118 que é dos que sofre maiores tensões à compressão, mostra-se na Figura 5.15 o comportamento destas tensões ao longo do tempo.

As informações dos gráficos da Figura 5.15 complementam-se e mostram que a resistência à compressão está assegurada, visto que o ponto nº 118 é onde se fazem sentir maiores tensões à compressão. Pode afirmar-se que para toda a estrutura está assegurada a segurança quanto ao esmagamento do betão.

Apresenta-se na Figura 5.16 o índice de fissuração para as linhas definidas.

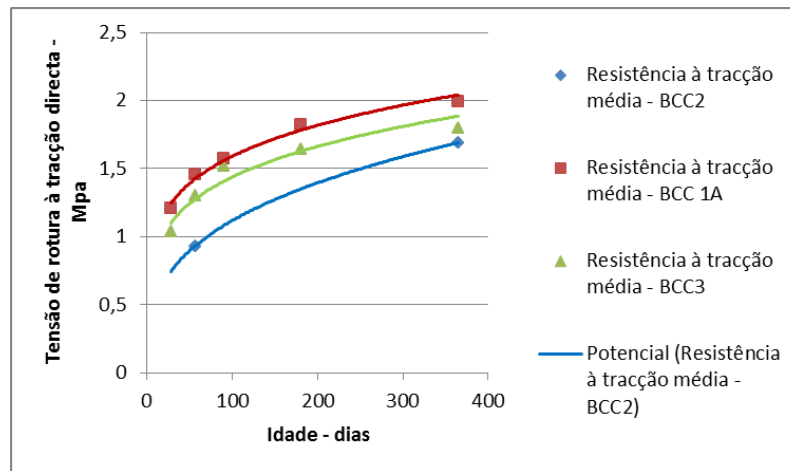


Figura 5.13: Variação da resistência à traccão média dos betões com a idade - [27].

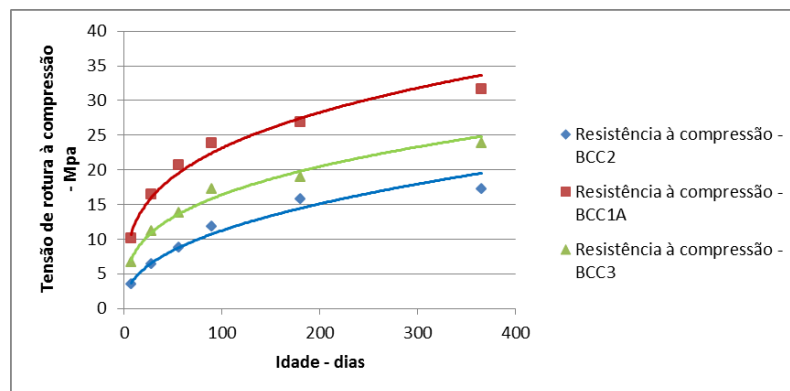
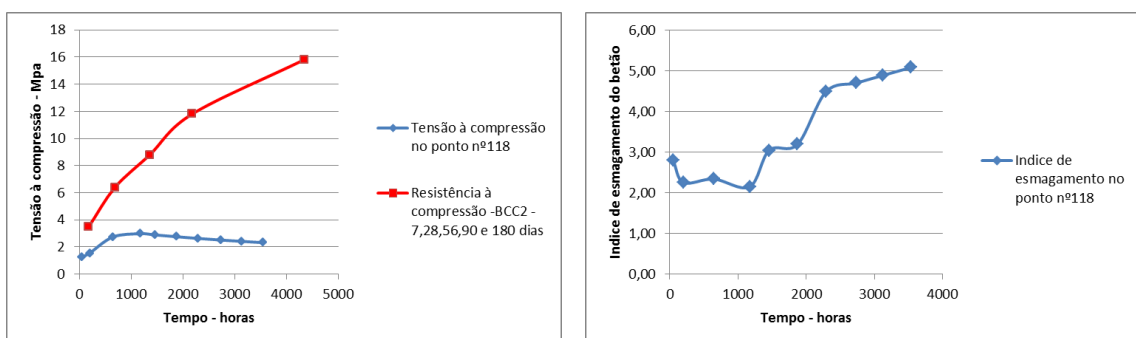


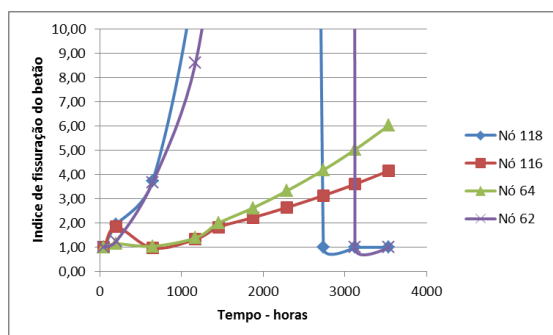
Figura 5.14: Variação da resistência à compressão média dos betões com a idade - [27].



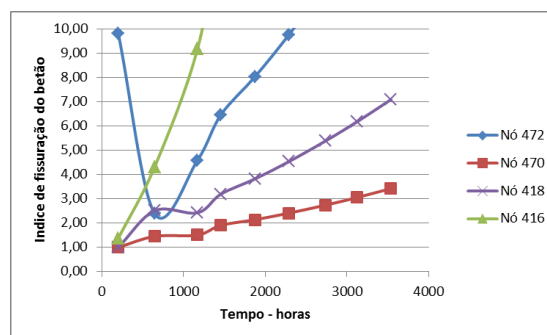
(a) Tensão à compressão e Resistência à compressão ao longo do tempo

(b) $I_{\text{esmagamento}}$

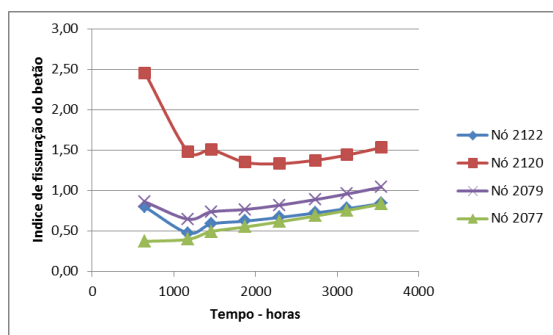
Figura 5.15: Probabilidade de esmagamento do betão para o ponto nº118.



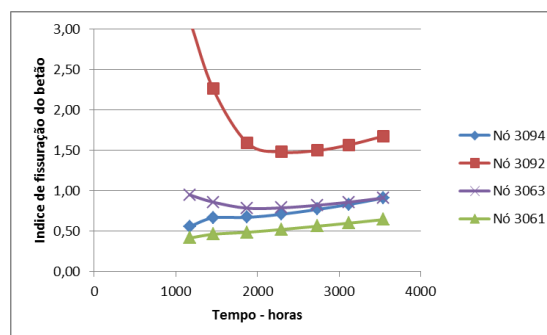
(a) Linha 1



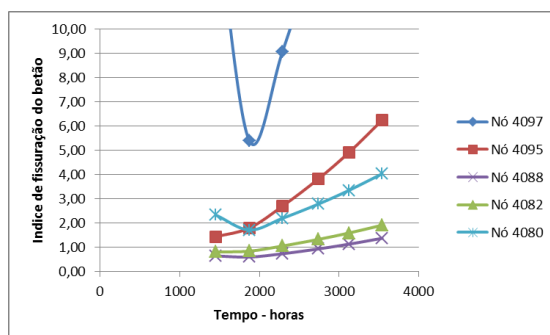
(b) Linha 2



(c) Linha 3



(d) Linha 4



(e) Linha 5

Figura 5.16: $I_{fissuracao}$ das linhas 1, 2, 3, 4 e 5.

Pela análise destas últimas figuras pode-se perceber onde existe um maior risco de fissuração dadas as tensões à tracção sentidas. Repara-se que junto ao maciço rochoso existe um risco bastante baixo de ocorrência de fissuração, já que os valores do índice ao longo do tempo estiveram sempre superiores a 1.

Quanto ao paramento de montante, observa-se que para os pontos que estão a 0.50m da extremidade correm um maior risco de fissuração, no entanto para a mesma cota já mais no interior do corpo da barragem a 1.50m esse risco desaparece. O que indica uma evolução decrescente nas tensões de tracção à medida que se vai da superfície do paramento de montante para o interior da estrutura, e assim uma garantia da segurança estrutural do corpo da barragem.

Para a superfície do topo da barragem, em geral, não surge um risco de fissuração muito elevado, já que só para os pontos nº 4082 e 4080 surge um índice de fissuração inferior a 1 e apenas para o betão com idade jovem.

No paramento de jusante é onde se revela um risco de fissuração maior, mas não sendo zonas críticas para a segurança global da estrutura não são preocupantes.

No geral, na observação dos gráficos da Figura 5.16, há uma tendência para o risco de fissuração ir diminuindo ao longo do tempo. Este fenómeno explica-se essencialmente por duas razões, primeiro pelo facto das tensões de tracção diminuírem conforme vai diminuindo a temperatura entre o núcleo da barragem e os paramentos e a segunda devido à resistência média das tracções do betão aumentar ao longo do tempo.

Capítulo 6

Conclusões e desenvolvimentos futuros

6.1 Conclusões gerais

A avaliação do comportamento térmico de uma estrutura de betão é de extrema importância dado o aumento de temperatura sentido no seu interior. Este aumento de temperatura é a consequência de uma reacção exotérmica, devido ao calor de hidratação do cimento característico do betão utilizado. Além do calor de hidratação, factores como a temperatura do betão fresco e a temperatura ambiente que se faz sentir, podem levar a um maior aumento, ou não da temperatura da massa central do interior de uma estrutura de betão. Frequentemente as barragem de betão compactado com cilindros são estruturas onde ocorre grande libertação de calor durante o seu processo construtivo, como é o caso analisado neste trabalho.

Ao ocorrer o fenómeno de libertação de calor, são geradas automaticamente tensões de origem térmica na estrutura em questão. O que quando se desenvolve em excesso pode causar a fissuração do betão e consequentemente pôr em causa a segurança e durabilidade da estrutura. Para o prevenir deve-se realizar então uma análise estrutural, que determina o risco de fissuração do betão pela comparação das tensões de tracção e compressão exercidas e a respectiva resistência do betão.

Ao longo deste trabalho foi desenvolvida uma metodologia no programa de elementos finitos ANSYS, com recurso à sua linguagem específica *Ansys Parametric Design Language - APDL*. É aplicada a técnica *Birth & Death* para recriar a sequência construtiva de uma barragem BCC. Esta técnica permite que os elementos referentes às camadas são considerados "activos" perante a malha geral de elementos finitos, à medida que cada camada seja executada/construída. Assim, é desenvolvida uma rotina que ao usar esta técnica realiza uma análise térmica ao longo do período de construção da barragem.

Esta análise térmica criada em ANSYS é aplicada a um modelo em 2D e comparada com os valores de outro modelo desenvolvido com o software FLAC. Os valores de temperatura obtidos pela sequência do ANSYS revelam-se bastante próximos dos do modelo em FLAC quando o modelo criado é refinado convenientemente.

Nesta sequência criada em ANSYS é permitida a definição de parâmetros de entrada, como a altura e comprimento de cada camada, o número de camadas a executar, o intervalo de tempo entre a execução de cada camada, as propriedades do betão entre as quais a curva de geração de calor e as condições de contorno (temperaturas) aplicadas em torno da estrutura.

A metodologia criada foi também aplicada a um caso de estudo, a primeira barragem BCC em Portugal, a Barragem do Pedrógão. É feita uma definição da geometria da barragem em estudo e é realizada uma análise térmica à mesma. Para este modelo são introduzidas algumas simplificações, que passam basicamente pela não contabilização das oscilações de temperatura diárias e anuais sentidas durante a construção da barragem e pelo uso de uma curva de geração de calor que não é a específica do betão utilizado.

Os valores de temperatura obtidos foram comparados com os dados observados no local da barragem do Pedrógão, mostrando que existe uma concordância bastante satisfatória entre eles, apesar da série de simplificações impostas no modelo em uso. Mais em particular observa-se que o modelo criado é capaz de reproduzir com menor erro as temperaturas que se desenvolvem mais no interior da massa de betão. Enquanto que as temperaturas com maiores erros são as definidas para pontos junto à superfície. Este último facto pode dever-se directamente ao facto de não se contabilizar com as oscilações diárias e sazonais de temperatura.

Foi igualmente desenvolvida uma metodologia em ANSYS para efectuar uma análise estrutural à barragem, e assim avaliar a segurança global da mesma estrutura em Pedrogão. Por meio da análise do risco de fissuração do betão, mostra-se que os pontos mais críticos de fissurar devido as tensões térmicas são os situados no paramento de jusante e uns a apenas 0.5m da superfície de montante. Todos os outros pontos, da superfície junto ao maciço rochoso e junto ao topo da barragem apresentam um risco bastante reduzido. Concluído-se assim que a estrutura é globalmente segura.

6.2 Desenvolvidos futuros

Pode-se dizer que esta metodologia é viável e pode simular relativamente bem as temperaturas originadas pela construção de uma barragem. Deste modo os desenvolvimentos futuros passam por se realizar análises paramétricas ao modelo criado, numa tentativa de otimizar a construção destas barragens, na redução de custos, e no aumento da velocidade de construção.

Assim, podem ser estudadas diferentes geometrias de barragens, associadas a diferentes intervalos de colocação de camadas, com diferentes espessuras e propriedades.

Outros desenvolvimentos futuros passam por otimizar o modelo criado, fazendo face às simplificações adoptadas nesta sequência, como por exemplo:

- Aplicação de uma equação que reproduza as variações de temperaturas diárias e sazonais do ambiente do local da barragem;

- Aplicação de diferentes modos de transferência de calor como condições de contorno, como a convecção e radiação;
- Integração de propriedades não lineares do betão, como é o caso do módulo de elasticidade, fluência e relaxação;
- Introdução de juntas verticais de contracção na sequência construtiva.

Bibliografia

- [1] *Programa Nacional de Barragens de Elevado Potencial Hidroeléctrico*. <http://pnbe-ph.inag.pt>. visitado em Julho de 2011.
- [2] *Software ANSYS versão 11.0*.
- [3] *Normas de Construção de Barragens - Portaria n.º 246/98*, Abril 1998.
- [4] *Regulamento De Segurança de Barragens (RSB) - Dec. Lei 344/2007*, Outubro 2007.
- [5] *The International Journal on Hydropower and Dams*, Maio 2011.
- [6] Afilhado, A.: *Física Aplicada à Engenharia Civil I - DEC*, termodinâmica e fluxo de calor edição, Março 2003.
- [7] American Concrete Institute - ACI 207.1R-96 - Committee 207: *Mass Concrete*, November 1996.
- [8] American Concrete Institute - ACI 207.5R-99 - Committee 207: *Roller-Compacted Mass Concrete*, Março 1999.
- [9] Azenha, M. Â. D.: *Comportamento do Betão nas Primeiras Idades. Fenomenologia e Análise Termo-Mecânica*. Tese de Mestrado, Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia, 2004.
- [10] Bouyge, B.: *RCC Dam Construction State of the Art in 2003*. páginas 121–133. Seventh International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams, 2003.
- [11] Castro, A. T.: *Barragens BCC - Aspectos Estruturais*. LNEC -DBB, 2008.
- [12] Coyne e Bellier: *Thermal Analysis of a RCC Dam Body*. ICOLD - 7th Benchmark Workshop, páginas 134–141, 2003.
- [13] FLAC: *FLAC - Version 5.0 - Optional Features*, 2005.
- [14] Heins: *RCC overhall view . Us Army Corps of Engineers - Jacksonville District*. Presentation 2007.
- [15] Jaafar, M.S., K.H. Bayagoob, J. Noorzaei e W.A.M. Thanoon: *Development of finite element computer code for thermal analysis of roller compacted concrete dams*. Science Direct, páginas 886–895, 2007.

- [16] Krüger, D. A. V.: *Análise Térmica Transiente de Estruturas de Concreto Executadas por Camadas*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Paraná - Curitiba, 2001.
- [17] Leitão, N. S., A. L. Batista e A. T. Castro: *Análise Termo-Mecânica de Estruturas Maciças de Betão. Aplicação a Barragens de Betão Compactado com Cilindros*. Memória do Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia, 2007.
- [18] Malkawi, A., S. Mutashe e T Qiu: *Thermal-Structural Modeling and Temperature Control of Roller Compacted Concrete Gravity Dam*. Journal of Performance of Constructed Facilities, páginas 177–187, 2003.
- [19] Malkawi, A. I., M. Aufleger e M.R. Al-Jammal: *Temperature Distribution in Al-Mujib Roller Compacted Concrete (RCC) Gravity Dam*. In *Geo Jordan*, 2004.
- [20] Martins, R. J.: *Aproveitamentos Hidroelétricos*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2007.
- [21] Meliço, J. A.: *Escolha de Formas de Barragens Abóbada*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- [22] Metereologia Portugal, Instituto de: *Normais Climatológicas - Beja [1971-2000]*.
- [23] Moser, D. E.: *Medidas Múltiplas de características de barragens de concreto compactado com rolo utilizando instrumentação por fibra óptica*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Paraná - Curitiba, 2006.
- [24] Nagayama, I.: *30 Years History of Roller-compacted Concrete Dams in Japan*. Public Works Research Institute, Japan, 2003.
- [25] Noorzaei, J., Bayagoob K.H., Noorzaei J., Thanoon W.A.M. e M.S. Jaafar: *Thermal and stress analysis of Kinta RCC dam*. ELSEVIER - Science Direct, páginas 1795–1802, 2006.
- [26] Perner, F.: *Thermal Analysis of RCC Gravity Dam*. In *7th - ICOLD Benchmark Workshop*, 2003.
- [27] Ribeiro, A. B.: *Betão Compactado com Cilindros Aplicado na Barragem de Pedrogão - Departamento de Materiais do LNEC*, Janeiro 2007.
- [28] Ribeiro, A. C.: *Betão Compactado com Cilindros - Composição e Características*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999.
- [29] Santana, M. S.: *Thermal Analysis of RCC Dams Construction*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte da caparica, Portugal, 1996.
- [30] Santos, F. O.: *Hormigón Compactado con Rodillo*. Revista de Obras Publicas, página 959 a 975, 1988.
- [31] Sukhatme, S.P. e U.N. Gaitonde: *Lecture Series on Heat and Mass Transfer*. <http://nptel.iitm.ac.in>, 2008. visitado em Julho 2010.

- [32] US Army Corps of Engineers EM 1110-2-2006: *Roller - Compacted Concrete*, 15 January 2000.
- [33] www: *Antevisão da barragem do Baixo Sabor/Alvito*, visitado em 11 de Julho de 2011. <http://www.a-nossa-energia.edp.pt>.
- [34] www: *DBB - ultimos dados de 15/05/2008*, visitado em 10 de Junho de 2011. <http://www.lnec.pt>.
- [35] www: *RCC Dams*, consultado em 20 de Maio de 2011. <http://www.rccdams.co.uk>.
- [36] www: *Rizzanese*, visitado em 11 de Julho de 2011. <http://www.rizzanese.fr/>.
- [37] Zingano, A. C.: *Manual da disciplina de Geologia de Engenharia*. Escola de Engenharia - UFRGS.

Apêndice A

Desenvolvimento da taxa de geração de calor

Segue-se a apresentação dos cálculos para a transformação da equação 4.1 de quantidade de calor na taxa de geração de calor, \bar{q} , para poder ser utilizada na equação 3.17.

Assim,

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \bar{q} \quad (\text{A.1})$$

Antes deste passo deve-se tratar as unidades da equação 4.1 convertendo-as de cal/g para as usadas pelo ANSYS para a propriedade de "Heat Generation per Volume", ou seja, W/m^3 [2].

1.

$$Q(t, T) = 95[1 - (t + 1)^{-(0.123+0.0035T)}] - cal/g \quad (\text{A.2})$$

2. Sendo $1 cal = 4.184J$ vem:

$$Q(t, T) = 397.48[1 - (t + 1)^{-(0.123+0.0035T)}] - J/g \quad (\text{A.3})$$

3.

$$Q(t, T) = 397480[1 - (t + 1)^{-(0.123+0.0035T)}] - J/kg \quad (\text{A.4})$$

4. Sendo a dosagem de cimento, neste caso, $240 kg/m^3$ de betão

$$Q(t, T) = 95.5E06[1 - (t + 1)^{-(0.123+0.0035T)}] - J/m^3 \quad (\text{A.5})$$

5.

$$Q(t, T) = 95.5E06[1 - (\frac{t}{3600} + 1)^{-(0.123+0.0035T)}] - J/s m^3 = W/m^3 \quad (\text{A.6})$$

Por fim,

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = - \frac{26527.7778 \left(\frac{1}{3600}t + 1 \right)^{(-0.123 - 0.0035T)} (-0.123 - 0.0035T)}{\frac{1}{3600}t + 1} \quad (\text{A.7})$$

Apêndice B

Rotina desenvolvida em Ansys

Em seguida apresenta-se a rotina desenvolvida em Ansys com os parametros utilizados em 4.4.2, mas passíveis de serem alterados conforme a intenção do utilizador.

```
l=2.5      !comprimento da camada
n=20       !nº camadas =nº areas
h=0.3      !altura da camada
t=25       !temperatura de colocação do betão
p=16       !intervalo de tempo entre camadas
pm=20      !refinamento da hora
rm=0.05    !refinamento da malha
q=6        !extensão do tempo

k=2.1      !condutibilidade térmica
c=833.3    !calor especifico
d=2400     !densidade

*Dim,calor,array,2,p*pm*n*q
*do,x,1,p*pm*n*q
calor(1,x)=x*3600/pm
calor(2,x)=-(26527.77778*(x/pm+1)**(-0.123-0.0035*t)*(-0.123-0.0035*t))/(x/pm+1)
*enddo

/CONFIG,NRES,9000000
/PREP7
ET,1,PLANE55
TOFFST,273

BLC4,0,0,1,h
*do,i,1,n
agen,n,1, , , ,h,
*enddo
```

```

NUMMRG,KP,0.01, , ,LOW
AESIZE,ALL,rm
AMESH,ALL

*do,i,1,n                ! prepara os nós para os gráficos
n%i%=node(2.25,h/2+(i-1)*h,0)
*enddo

MP,KXX,1,k
MP,C,1,c
MP,DENS,1,d

/SOLUTION
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
AUTOTS,1
OUTRES,ERASE
OUTRES,BASIC,ALL
NROPT,FULL

IC,ALL,TEMP,t,

asel,s,area,,2,n  ! selecconar e mata da 2a camada ate n camadas
esla,s
ekill,all
allsel,all

lssel,s,loc,y,0
dl,all, ,temp,t
lssel,s,loc,y,h
dl,all, ,temp,t

lssel,s,loc,y,0,h
lssel,r,loc,x,0
dl,all, ,temp,t
lssel,all

bfunif,hgen,-(26527.77778*(0/pm+1)**(-0.123-0.0035*t)*(-0.123-0.0035*t))/(0/pm+1)
time,1
nsub,10
solve

*do,x,1,p*pm
TIME,calor(1,x)
BFA,1,HGEN,calor(2,x)
SOLVE

```

```

*enddo

*do,i,2,n                                !loop sobre camadas adicionais
asel,s,loc,y,(i-1)*h,i*h
esla,s
ealive,all

allsel,all

lssel,s,loc,y,(i-1)*h
dldele,all,temp
lssel,s,loc,y,i*h
dl,all, ,temp,t
lssel,s,loc,y,(i-1)*h,i*h
lssel,r,loc,x,0
dl,all, ,temp,t
allsel,all

*if,i,EQ,20,THEN

*do,x,(i-1)*p*pm+1,(i*p*pm)+(q*p*pm)
TIME,calor(1,x)
*do,s,1,i                                ! loop sobre camanadas actualmente activas
BFA,s,HGEN,calor(2,x-(s-1)*p*pm)
*enddo
SOLVE
*enddo

*else

*do,x,(i-1)*p*pm+1,i*p*pm                !loop do tempo
TIME,calor(1,x)
*do,s,1,i                                ! loop sobre camanadas actualmente activas
BFA,s,HGEN,calor(2,x-(s-1)*p*pm)
*enddo
SOLVE
*enddo
*endif
*enddo

!definição dos gráficos com as temperaturas para um determinado nó ao longo do tempo
/post26
*do,i,1,n
nsol,i+1,n%i%,temp,
*enddo

```